

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: 2612R011 – Elektrické informační a řídicí systémy

**Optický systém detektoru Cherenkovova záření –  
justace a testování**

**Optical concentrators for Cherenkov light detector –  
adjustment and testing**

**Bakalářská práce**

Autor: Jarda Polák  
Vedoucí práce: Doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D. (TUL)  
Konzultant: Dr. Silvia Dalla Torre (INFN Trieste)

V Liberci 3.1.2008

## Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má plné právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

## Abstract

A fast photon detection system has been built for the upgrade of COMPASS RICH-1, the large size gaseous RICH detector in use at the COMPASS Experiment at CERN SPS since 2001. The photon detectors of the central region have been replaced by a new system based on very fast UV extended multianode photomultipliers, each coupled to an individual fused silica telescope. The purpose of the optics is to focus the Cherenkov photons on the sensitive cathodes.

Testing procedures for the quality control and validation of the optical concentrators have been developed and implemented. Each lens and each complete two-lens telescope have been controlled employing the Hartmann method by a custom setup and analysis code. These routines use as reference a theoretical lens simulated with ZEMAX commercial package and also a real reference – a prototype lenses precisely tested by interferometric methods. The quality and alignment of each lens is characterized by measuring wavefront distortion.

The most critical parameter is the precise positioning of the lenses, therefore a special procedure for correction was developed and used to obtain final optical properties within desired tolerances.

The image displacement introduced by optics imperfection is below  $50\mu\text{m}$  for most of the telescopes, and in all cases below  $150\mu\text{m}$ . The result obtained cause displacement of less than 5% of the photons hits to a neighboring pixel.

The COMPASS experiment started data taking in July 2006 and the first feedback indicates excellent performance of the new photon detection system of the RICH-1 detector.

## Abstrakt

Byl realizován upgrade detektoru RICH-1 v experimentu COMPASS v CERN. Centrální část detektorových panelů byla osazena novým velmi rychlým detekčním systémem založeným na velmi rychlých fotonásobičích. Každý z fotonásobičů byl spojen s individuálním dvouočkovým teleskopem. Úkolem teleskopu je fokusovat Cherenkovovy fotony pouze na aktivní oblast fotonásobiče.

Byla vyvinuta a implementována procedura testování kvality optických komponent teleskopů. Každá čočka a každý teleskop byt testován pomocí Hartmannovy metody. Byla vyvinuta testovací aparatura a příslušný software pro analýzu dat. Tento software používá jako referenční hodnoty teoretické čočky simulované pomocí programu ZEMAX a také reálné reference – prototypy čoček precizně testované pomocí interferometrických metod. Kvalita a justace čoček byla charakterizována pomocí měření deformace vlnoplochy.

Nejkritičtějším parametrem bylo přesné umístění čoček, proto byla vyvinuta metoda pro korekci nepřesností, aby bylo možno dosáhnout požadovaných tolerancí.

Posun obrazu v rovině detektoru způsobený vadami optické soustavy byl pro většinu teleskopů menší než  $50\ \mu m$  a pro všechny teleskopy menší než  $150\ \mu m$ . Tyto výsledky znamenají že méně než 5 % fotonů dopadá na sousední pixel fotonásobiče.

COMPASS zahájil sběr dat v červnu 2006 a první měření ukazují vynikající výkonnost nového systému detekce fotonů detektoru RICH-1

## Obsah

Abstract.....	4
Abstrakt.....	5
Obsah.....	6
Seznam použitých symbolů a zkratek.....	8
1 Úvod.....	9
2 COMPASS RICH-1 a jeho upgrade.....	10
2.1 Experiment COMPASS v CERN.....	10
2.2 Detektor RICH.....	11
2.2.1 Princip detektoru RICH.....	11
2.2.2 COMPASS RICH-1.....	12
2.3 RICH-1 Upgrade projekt.....	13
2.4 Optický systém.....	14
2.5 Mechanika.....	15
3 Testování optiky – teorie.....	17
3.1 Výběr metody.....	17
3.2 Hartmanova metoda.....	18
3.3 Teoretický popis.....	21
3.3.1 Vlnoplocha a její popis.....	21
3.3.2 Snímání vlnoplochy pomocí Hartmannova testu.....	24
3.3.3 Algoritmus rekonstrukce vlnoplochy.....	26
4 Testování optiky – realizace testů.....	28
4.1 Metodika testování.....	28
4.2 Testovací kritéria.....	30
4.3 Softwarové simulace.....	33
4.4 Testovací aparatura.....	34
4.5 Softwarová implementace.....	36
4.6 Testování prototypů.....	37
4.6.1 Test prototypů prizmatických čoček.....	37
4.6.2 Test prototypů asférických čoček.....	38
4.7 Test kvality prizmatických čoček.....	40
4.8 Test justace prizmatických čoček.....	42

4.9 Test asférických čoček.....	44
4.10 Test kompletních teleskopů.....	46
4.11 Kompenzace vad teleskopů.....	47
5. Zhodnocení výsledků měření.....	48
6 Závěr.....	50
Seznam Literatury.....	51
Přílohy.....	53

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$c$	rychlost světla ve vakuu
$v$	rychlost částice
$\phi_{Ch}$	Cherenkovův úhel
$f$	ohnisková vzdálenost soustavy fokusující Cherenkovovo záření na detektor
$n$	index lomu prostředí (média)
$r$	poloměr kroužků pozorovaných na detektoru
$m$	hmotnost částice
$p$	hybnost částice
$\lambda$	vlnová délka
$q$	náboj částice
$E$	energie
$N$	počet fotonů
$h$	Planckova konstanta
$\Xi_w$	vlnoplocha (jako funkce)
$\Xi_{wo}$	referenční vlnoplocha
$C_i$	koeficienty rozvoje
$f_i$	bázové funkce
$Z_i(\rho, \theta)$	Zernikeho polynomy
$Z_{n,m}(\rho, \theta)$	Zernikeho polynomy
$R_n^m$	koeficienty rozvoje Zernikeho polynomu
$W$	aberační funkce
$\theta_{x_i}, \theta_{y_i}$	úhel naklonění vlnoplochy
$D$	vzdálenost Hartmannovy masky od detektoru
$x_i, y_i$	souřadnice i-tého otvoru Hartmannovy masky
$\Delta x_i, \Delta y_i$	posun středu obrazu i-tého otvoru Hartmannovy masky
<b>HTA</b>	Hartmannova testovací aparatura

# 1 ÚVOD

Byl vyvinut a realizován nový systém velmi rychlé detekce fotonů v detektoru RICH-1 experimentu COMPASS. Jako detektory byly použity velmi rychlé multianodové fotonásobiče, které nahradily stávající detektory v nejkritičtější centrální části detektoru. Celkem bylo použito 576 fotonásobičů. Každý z fotonásobičů je spojen s dvoučočkovým teleskopem, jehož úkolem je fokusovat obraz pouze na aktivní oblast fotonásobiče. Správná funkce teleskopů je tak klíčovou podmínkou pro úspěšnou realizaci projektu upgradu detektoru RICH-1.

Skupina TUL, pod vedením Doc. Šulce, byla plně zodpovědná za vývoj a výrobu optických komponent. Návrh teleskopu a jeho optimalizace byla řešena v rámci diplomové práce ing. D. Kramera [7].

Tato práce si klade za cíl popsat metodiku a implementaci testování optických komponent. Výsledkem této práce musela být jistota, že veškerá optika je vyrobena a osazena s požadovanými tolerancemi. Během maximálně 16 měsíců vyhrazených na tuto práci tak bylo nutno:

- Provést analýzu a vybrat vhodnou metodu pro testování.
- Provést simulace testování optických komponent.
- Vyvinout aparaturu pro testování i s příslušným softwarem pro zpracování dat.
- Ověřit funkčnost testovací aparatury.
- Otestovat prototypy čoček a vybrat vhodné výrobce (resp. schválit).
- Provést nezbytné testy všech optických komponent – tedy plně charakterizovat 576 dvoučočkových teleskopů.
- Sestavit teleskopy a provést případné korekce vad.
- Podílet se na dalších montážních pracích navazujících na montáž optiky.

Je zřejmé, že hlavním kritériem se stalo časové měřítko (ukázalo se že pouze vlastní testování optických prvků představovalo úkol plně charakterizovat ~2500 optických komponent). Testovací aparatura a testování samé, popisované touto prací, používá pokud možno co nejjednodušších prostředků (resp. nejrychleji dosažitelných) při zachování požadované přesnosti. Veškerý vývoj se zaměřoval na testování konkrétních vlastností konkrétního optického systému.



Všechny požadované kroky byly v daném čase úspěšně splněny. Většina teleskopů (70 %) má vady, které způsobují posunutí obrazu na detektoru o méně než  $50\ \mu m$  (20 % způsobuje posunutí o méně než  $100\ \mu m$  a 10 % čoček je v  $150\ \mu m$  toleranci). Aktivní oblast fotonásobičů je tvořena 16 pixely každý s rozměrem  $4 \times 4\ mm^2$  (mezera mezi pixely je  $0,1\ mm$ ). Deformace obrazu daná vadami teleskopu tak způsobuje, že méně než 5 % fotonů dopadá na nesprávný pixel. Což je v dobré korespondenci s vadami vznikajícími v elektronické části detektoru (přeslechy mezi kanály,...).

Upgradovaný detektor po zahájení činnosti vykazoval pronikavé zlepšení parametrů. Kroužek identifikující částici je nyní tvořen v průměru 56 fotony (oproti 14 před upgradem), systém nyní vykazuje velice nízké pozadí (tvořené nekorelovanými miony), globální rozlišení měřených Cherenkovových úhlů je nyní menší než  $0,3\ mrad$  (dříve 0,6), zlepšila se efektivita identifikace částic jak pro nízké tak i pro vysoké hybnosti, je možné separovat  $\pi/K$  až do  $55\ GeV/c$  (dříve 43) a v poslední řadě se zlepšilo časové rozlišení na  $\sim 0,5\ ns$  (původně  $\sim 3\ \mu s$ ).

Detektor RICH-1 se tak po upgradu stal nejefektivnějším a nejlépe pracujícím detektorem svého druhu na světě.

## 2 COMPASS RICH-1 a jeho upgrade

### 2.1 Experiment COMPASS v CERN

Experiment COMPASS [1,2] v CERN se věnuje studiu struktury spinu nukleonů a hadronové spektroskopii. Jde o dvoustupňový spektrometr sledující rozptyl intenzivního svazku polarizovaných mionů (produkovaných urychlovačem SPS v CERN) na pevném terči. Vzniklé částice jsou detekovány pomocí soustavy detektorů. Energie částic se měří pomocí kalorimetrů (ECAL, HCAL), soustava trackových detektorů sleduje trajektorii částic, klíčovou částí experimentu je detektor RICH sloužící pro identifikaci částic. Schéma experimentu COMPASS viz příloha 1.

### 2.2 Detektor RICH

Hlavním úkolem detektoru RICH je s vysokou přesností identifikovat a separovat elektrony, miony, kaony a protony vzniklé rozptylem na polarizovaném terči.

### 2.2.1 Princip detektoru RICH

Detektor je tvořen uzavřenou nádobou v které je vhodné dielektrické médium. Vletí-li do detektoru nabitá částice a pohybuje se v médiu rychlostí vyšší než je rychlost světla v daném médiu (resp. rychlostí vyšší než je prahová rychlost daná vztahem 2.1), dochází ke vzniku tzv. Cherenkovova záření (jde o analogický efekt jako je rázová vlna při nadzvukových rychlostech). Ve směru letu částice se šíří kužel světla. Úhel rozevření kužele závisí pouze na rychlosti částice a indexu lomu média.

$$\cos \phi_{Ch} = \frac{1}{n(\lambda)\beta} \quad , \text{ kde } \beta = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

Kužel světla je fokusován optickým systémem na detektor , kde tvoří malý kroužek. Průměr a střed tohoto kroužku dává informaci o rychlosti a směru letu částice.

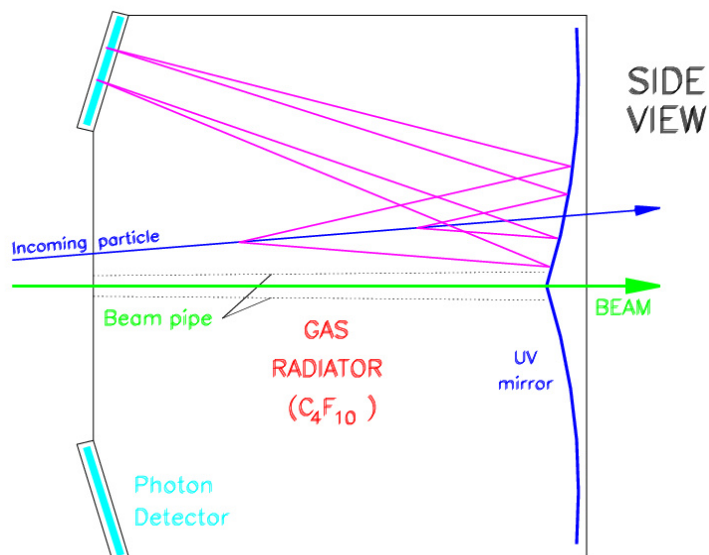
Průměr kroužku  $r$  na detektoru je dán vztahem

$$r = f \cdot \tan \phi_{Ch} \quad (2.2)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost optického systému (předpokládáme sférický tvar zrcadel fokusujících Cherenkovovy fotony na detektor.)

Vztah mezi hybností  $p$  a hmotností  $m$  pak umožňuje identifikovat jednotlivé částice.

$$m = p \sqrt{n^2 \cos^2 \phi_{Ch} - 1} \quad (2.3)$$



Obr. 1: Princip detektoru RICH

Množství energie  $dE$  které se vyzáří při pohybu částice s nábojem  $q$  na dráze  $dx$  je možno vyjádřit vztahem:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q^2}{c^2} \int_{\omega} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega d\omega \quad , \text{ kde } \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4)$$

Počet fotonů  $dN$  s energií  $hf$  vyzářených na dráze  $dx$  je:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{dW}{dx} \cdot \frac{\lambda}{hc} = \frac{4\pi^2 q^2}{hc} \cdot \int_{\lambda} \frac{\left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right)}{\lambda^2} d\lambda \quad , \quad (2.5)$$

kde výraz  $\frac{\left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right)}{\lambda^2}$  představuje spektrum Cherenkovova záření. Spektrum

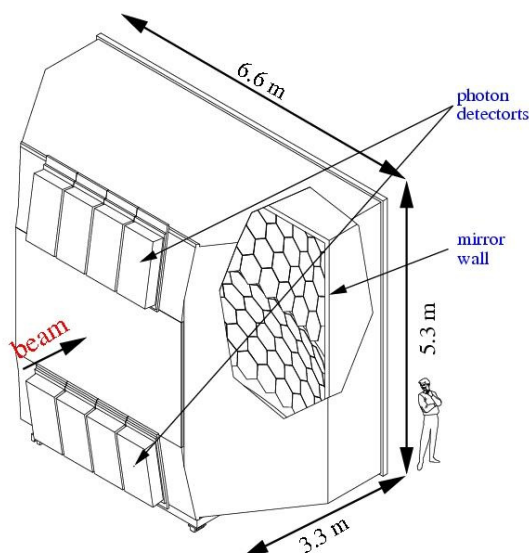
je spojitě a množství vyzářených fotonů klesá se čtvercem vlnové délky. V praxi proto detektory Cherenkova záření obvykle pracují v UV oblasti. Podrobnější informace je možno nalézt v [12].

### 2.2.2 COMPASS RICH-1

RICH-1 je největším a nejsložitějším detektorem experimentu COMPASS [1]. Jeho rozměry jsou patrné z Obr.2. Jako médium se používá plyn  $C_4F_{10}$ . Stěna zrcadel je tvořena 116 s elementy, které vytváří dva sférické povrchy s plochou  $21 m^2$  (odrazivost lepší než 80 % v oblasti 165-200 nm). Fotony Cherenkovova záření jsou stěnou zrcadel fokusovány na detektory. Jako detektory fotonů sloužilo 8 drátových proporcionálních komor (Multi Wire Proportional Chambers) s fotokatodami z  $CsI$ . Materiál  $CsI$  byl zvolen pro velmi dobrou kvantovou účinnost v UV oblasti (pod 200 nm). Fotokatody jsou rozděleny na čtvercové pixely 8x8mm s celkovou aktivní plochou  $5,3 m^2$ .

Před upgradem detektoru byl kroužek identifikující částici tvořen 14 fotony, globální rozlišení měřených Cherenkovových úhlů 0,6 mrad a efektivita identifikace částic přes 95 % [3-6], dovolující separaci  $\pi/K$  až do hybností 43 GeV/c. Doba průletu částice detektorem je v řádu desítek nanosekund, snímání a vyhodnocování údajů detektorem a příslušnou elektronikou musí být velmi rychlé. Čas potřebný k čtení dat ( $\sim 3\mu s$ ) a dominantní pozadí (tvořené nekorelovanými miony) v centrální části detektoru významně

snižovaly výkony detektoru. Plánované zvýšení intenzity svazku (z 40 na 100  $MHz$ ) a frekvence triggeru (z 20 na 100  $kHz$ ) si vynutilo upgrade centrální části detektoru s cílem zkonstruovat velmi rychlý systém detekce fotonů.



Obr. 2: COMPASS RICH 1

### 2.3 RICH-1 Upgrade projekt

Centrální část detektoru fotonů (4 centrální panely detektorů z celkových 16) byla vybavena novým systémem založeným na multianodových fotonásobičích (MAPMT) [3-6]. Každý z fotonásobičů je spojen s individuálním teleskopem a elektronikou sbírající data. U stávající části detektorů (MWPC + CsI fotokatody) byla nainstalována nová elektronika (lepší časové rozlišení,...).

Jako nové detektory fotonů jsou použity 16 kanálové fotonásobiče R7600-03-M16 firmy Hamamatsu. Aktivní oblast fotonásobiče ( $18 \times 18 \text{ mm}^2$ ) je rozdělena na 16 pixelů ( $4 \times 4 \text{ mm}^2$ ) s mezerou mezi sousedními pixely 0,5 mm. Celkem 576 fotonásobičů je rozděleno do 4 panelů ( $12 \times 12$ ), každý je vybaven krycím sklem se zvýšenou propustností v UV oblasti, děličem napětí a krycím boxem z magneticky měkkého železa, které chrání fotonásobič před účinky magnetického pole. Každý z fotonásobičů byl individuálně testován [8].

Signál z fotonásobičů je čten rychlým analogovým systémem založeným na čipu MAD4, který slouží jako předzesilovač a diskriminátor. MAD4 umožňuje pracovat

s frekvencí  $\sim 1\text{ MHz}$  na kanál, právě probíhající vývojové práce mají za cíl zvýšit frekvenci až na  $5\text{ MHz}$ . Vynikající časové rozlišení MAPMT ( $\sim 330\text{ ps}$ ) je možno využít pomocí digitálních karet zvaných DREISAM, na kterých jsou umístěny čipy F1 TDC, které mají časové rozlišení  $\sim 110\text{ ps}$ . Z DREISAM karet jsou data transportována pomocí optického kabelu přímo do COMPASS readout and acquisition system. Veškeré elektronické komponenty jsou namontovány přímo na detektoru a tvoří velice kompaktní celek vybavený vodním chlazením a stíněný proti účinkům elmagetického pole.

Opravdovou výzvou je však optický systém jehož úkolem je přenést obraz z fokální roviny zrcadel na aktivní oblast fotonásobičů. Požadavky na systém jsou široká úhlová akceptance Čerenkovových fotonů, optimalizace pro kvantovou účinnost fotonásobiče, přizpůsobení se mechanickým požadavkům, minimální distorze obrazu s cílem zabránit přeslechům mezi kanály na fotonásobiči a především snadná vyrobiteľnost v daném čase při omezených finančních prostředcích.

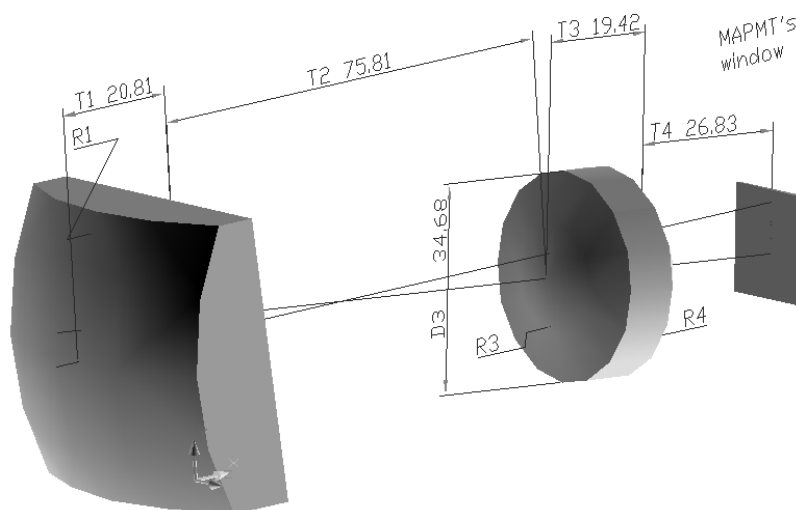
## 2.4 Optický systém

Problematika konstrukce optického systému byla řešena D. Kramerem v rámci diplomové práce (s názvem „Systém pro soustředění světla v detektoru Čerenkovova záření“) pod vedením Doc. M. Šulce [7].

Jako finální řešení byl zvolen dvoučočkový teleskop před každým fotonásobičem (celkem tedy 576 teleskopů), který zobrazuje oblast ( $48 \times 48\text{ mm}^2$ ) ve fokální rovině zrcadel na aktivní plochu fotonásobiče ( $18 \times 18\text{ mm}^2$ ). Systém umožňuje plnou akceptanci fotonů přilétajících pod úhly do  $8,3^\circ$  (50 % akceptance pro úhly  $\sim 9,5^\circ$ ). Systém je optimalizován pro vlnovou délku  $300\text{ nm}$ , kde má fotonásobič nejvyšší kvantovou účinnost (fotonásobič je schopen detekovat fotony v oblasti  $200\text{--}600\text{ nm}$ ). Protože intenzita Čerenkovova záření velmi rychle (kvadraticky) roste s klesající vlnovou délkou, nelze použít běžné optické materiály. Jako materiál z kterého budou čočky vyrobeny byl zvolen tavený křemen HPFS Standart Grade, Corning code 7980, 5D. Čočky jsou vyrobeny pomocí standartní techniky broušení a leštění, což nepředstavuje problém pro prizmatickou čočku, výroba asférického povrchu je technologicky velice náročným úkolem. Všechny optické povrchy jsou opatřeny antireflexní vrstvou  $\text{MgF}_2$  (což představuje  $\sim 8\%$  zvýšení počtu detekovaných fotonů). Z důvodu nedostatku prostoru bylo nutné aby pole detektorů

bylo skloněno pod úhlem  $16^\circ$ , mechanická konstrukce detektoru však dovoluje naklonění pouze  $11^\circ$ . Proto byl navržen neaxiální design optické soustavy.

Vlastní teleskop se skládá ze dvou čoček, v dalším textu nazývané *prizmatická* a *asférická*. Prizmatická plankonvexní čočka má obdelníkovou aperturu ( $48 \times 44,8 \text{ mm}^2$ ). První optický povrch je sférický ( $R_1 = 54,94 \text{ mm}$ ), druhá plocha je rovinná s klínem  $5^\circ$ . Asférická bikonvexní čočka (kondenzor) promítá obraz na aktivní oblast fotonásobiče. Apertura asférické čočky je kruhová ( $37,8 \text{ mm}$ ), první optický povrch je asférický ( $R_3 = 20,7 \text{ mm}$  s asférickým koeficientem 4. řádu  $\alpha_2 = 6,1388 \cdot 10^{-5}$ ), druhý povrch čočky je sférický ( $R_4 = 24,96 \text{ mm}$ ). Detailní informace o čočkách viz příloha 2,3.



Obr. 3: 3D model optické soustavy

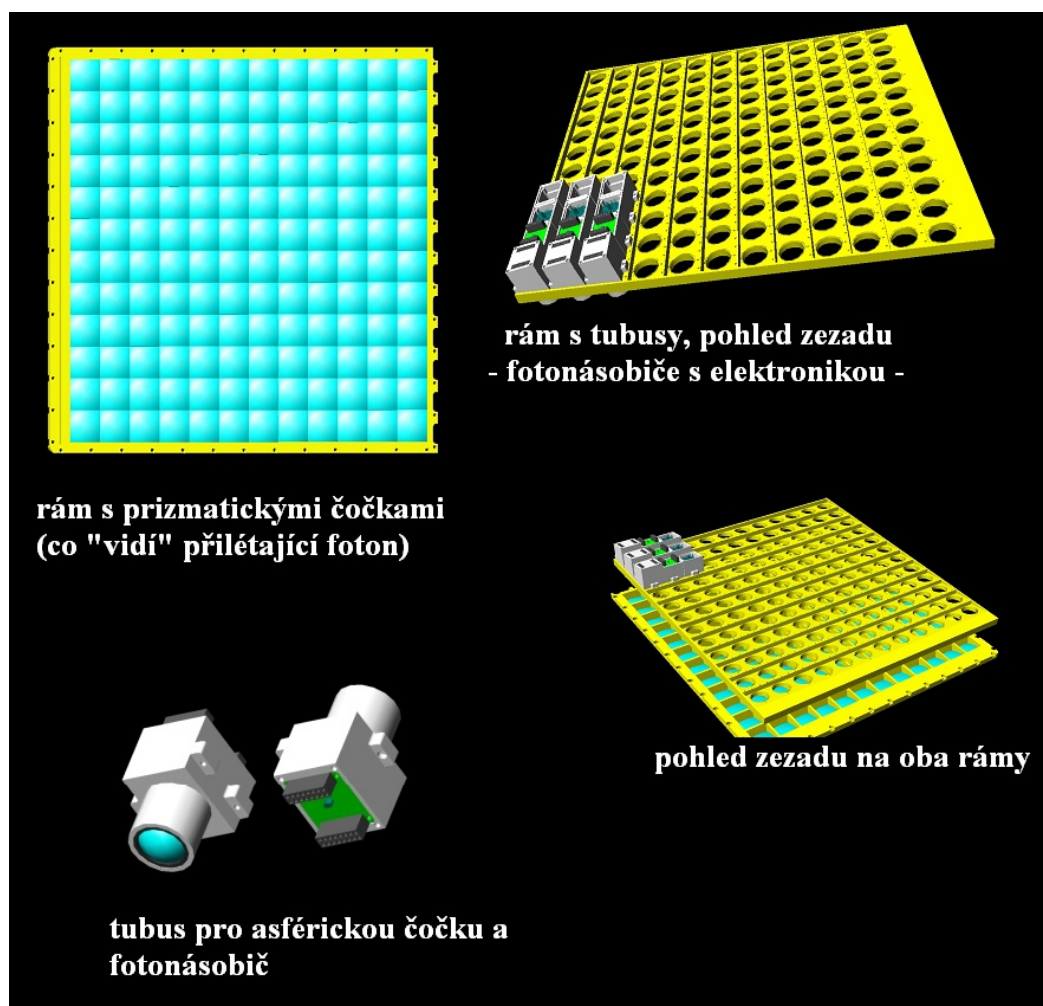
## 2.5 Mechanika

V této kapitole je popsána pouze mechanická konstrukce která souvisí s optickým systémem a zásadním způsobem ovlivňuje jeho vlastnosti (poloha optických komponent).

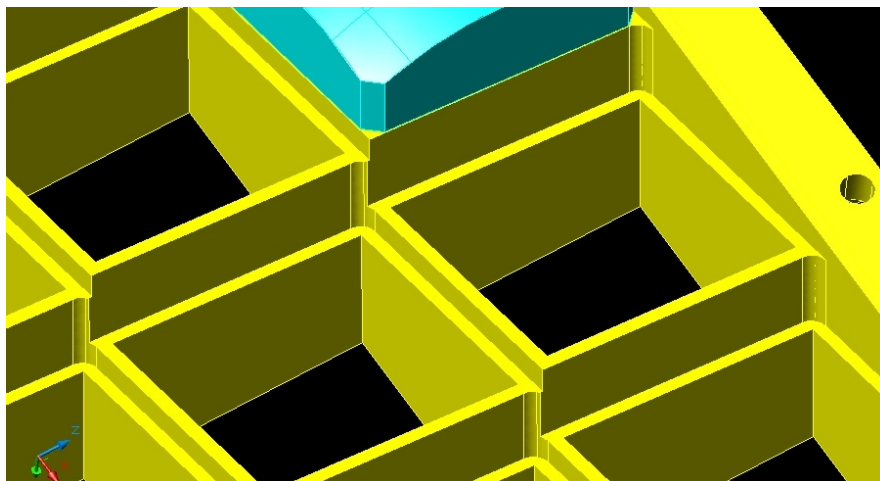
Jedno detektorové pole (z celkem 4 upgradovaných) je tvořeno dvěma duralovými rámy (vyrobenými pomocí CNC obráběcího centra ve Freiburgu), které jsou spojeny šroubovým spojem. V prvním rámu jsou uchyceny prizmatické čočky (rám pro  $12 \times 12$  čoček).

Jedním z cílů upgrade projektu je minimalizovat ztráty fotonů, proto prizmatické čočky jsou umístěny těsně vedle sebe. Bylo rozhodnuto prizmatické čočky k rámu přilepit speciálním lepidlem. Celý spoj je vzduchotěsný – je třeba zamezit únikům média z nádoby. Prizmatické čočky tvoří přímou řadu, ale jsou odsazeny – viz Obr. 5. Ukázalo se, že toto řešení zlepší úhlovou akceptanci optické soustavy.

Do otvorů v druhém rámu jsou přišroubovány speciální tubusy z magneticky měkkého železa na jejichž jednom konci je mechanicky upevněna asférická čočka, na druhém konci tubusu je fotonásobič. Celý tubus je tvořen dvěma mechanicky spojenými částmi. K rámu je přichycena část s asférickou čočkou k níž je později přišroubována část s fotonásobičem.



*Obr. 4: Koncepce designu mechanických částí*



*Obr. 5: Detail odsazení prizmatických čoček*

Spojením obou rámců vzniká jedno detektorové pole tvořené 144 fotonásobiči (každý s 4x4 pixely, jedno detektorové pole tak disponuje rozlišením 48x48 pixelů). Při menším počtu fotonásobičů už by docházelo ke ztrátě požadované rozlišovací schopnosti. Je zřejmé že výrobní tolerance mechanických částí zásadním způsobem ovlivňují přesnost polohy jednotlivých optických komponent.

### 3 Testování optiky – teorie

#### 3.1 Výběr metody

Kvalita optického systému je dána dvěma požadavky:

1. minimalizovat ztráty fotonů průchodem optickou soustavou
2. zajistit aby fotony nedopadaly na neaktivní oblasti fotonásobiče

Nároky na kvalitu zobrazení nejsou velké, v našem případě jde o kondenzorovou optiku [7,9]. Předmětem testování je zjistit:

1. Zda dodané čočky odpovídají požadavkům (kvalita a přesnost povrchu v rámci tolerancí, spektrální propustnost).
2. Změřit zda jsou všechny čočky správně upevněny. Pokud nejsou tolerance na upevnění dodrženy, je nutno danou čočku demontovat a upevnit znovu.



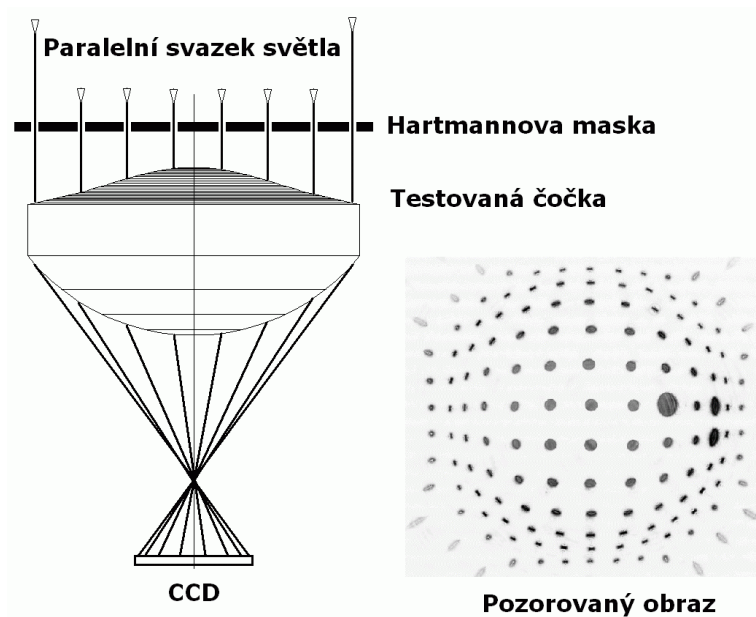
- Všechny čočky jsou vyrobeny ze stejného materiálu, proto lze předpokládat, že budou mít prakticky stejnou spektrální propustnost. Není tedy nutné provádět měření všech čoček.
- Požadavky na kvalitu povrchu nejsou velké, proto bude postačovat optická kontrola každé čočky během dalšího testování.
- Je nezbytně třeba kontrolovat přesnou justaci všech čoček (zejména v případě asférické čočky).
- Je třeba zjistit zda čočky nejsou vyrobeny s vadami, které by způsobily kritickou deformaci obrazu (tj. aby foton dopadl tam kam má podle návrhu).

Testování musí být rychlé a jednoduché. Musí být provedeno v průběhu montáže – aby bylo možno opravit chybnou justaci čočky. Nesmí dojít ke zdržení ostatních probíhajících operací. Musí být dokončeno před montáží dalších komponent (instalace fotonásobičů, elektroniky,...). Vyhodnocení dat musí probíhat v reálném čase.

Po zvážení různých metod (interferometrické, Ronchi, apod.) jsme se rozhodli použít Hartmannovu metodu. Hlavním důvodem je její jednoduchost (jednoduchá realizace i analýza ve srovnání s jinými metodami) a zároveň značná přesnost.

### **3.2 Hartmanova metoda**

Tato metoda byla navržena J.H. Hartmannem roku 1905. Její princip je velmi jednoduchý. Před testovanou optickou soustavu umístíme masku s otvory. Testovací aparaturou necháme procházet paralelní svazek světla a na detektoru za optickou soustavou sledujeme vzniklý obraz.



*Obr. 6: Princip Hartmannovy metody*

Různé vady testované optické soustavy způsobují deformace obrazu Hartmannovy masky. Deformuje se jak vzájemná vzdálenost obrazů otvorů, tak i jejich tvar. Vyhodnocením těchto údajů je možno získat velmi dobrou informaci o tvaru vlnoplochy, velikosti jednotlivých aberací (lze určit Zernikeho polynomy, Seidelovy sumy,...), naklonění, decentrování optické soustavy [14,15,17,18,22].

Modernější varianta Hartmannova testu s označením Shack-Hartmannova metoda [19,20,23] nepoužívá masku s otvory, ale pole mikročoček umístěných za testovanou optickou soustavou, které fokusují obraz na detektor. Opět dochází k deformaci obrazu. Tato metoda poskytuje přesnější data než klasická Hartmannova metoda.

Hartmannova resp. Shack-Hartmannova metoda je velmi často používána zejména v astronomické optice (testování a justace optiky), při určování vad a chirurgii oka, dobře se také uplatňuje v experimentech s adaptivní optikou, kde slouží jako senzor pro zpětnou vazbu. Používá se v řadě dalších aplikací. Byla úspěšně vyzkoušena kolegy při testování zrcadel RICH detektoru experimentu LHCb [28].

Základní charakteristiky Hartmannovy metody:

- je použitelná pro různé vlnové délky
  - nevyžaduje monochromatické světlo
  - není citlivá na vibrace
  - je porovnatelná s interferenčními testy
  - je rychlá a relativně jednoduchá (v porovnání s jinými metodami)
  - umožňuje realizovat měření v reálném čase
  - má malé nároky na prostor, vybavení a finanční prostředky
  - testování asférických ploch není výrazně obtížnější než sférických
  - jsou detekovány i aberace jako astigmatismus
- 
- optické členy jsou testovány pouze v místech průchodu světla – tzn. úzce lokalizované vady nemusí být detekovány.

Hartmannova metoda umožňuje porovnat naměřené výsledky s referenčními hodnotami, které mohou být představovány jak teoretickými výsledky (získanými pomocí programu ZEMAX), tak s reálnými vzorky čoček.

Je možno konstatovat, že tato metoda byla s úspěchem použita v řadě aplikací vyžadujících mnohem větší přesnost než požadujeme my. Hlavním výstupem našeho měření je především informace o decentrování a naklonění každé čočky.

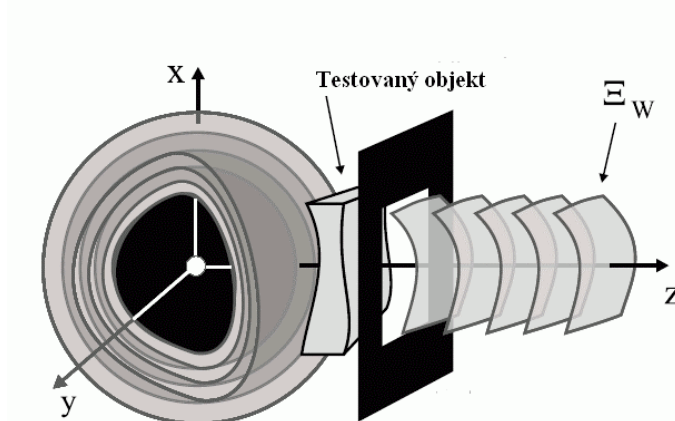
### 3.3 Teoretický popis

#### 3.3.1 Vlnoplocha a její popis

Převzato z [14] .

Vlnoplochu  $\Xi_w$  šířící se podél osy  $z$  můžeme popsat jako funkci  $x, y$ .

$$\Xi_w = F(x, y) \quad (3.1)$$

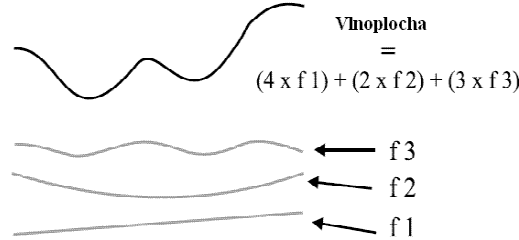


Obr. 7: Vlnoplocha

$F(x, y)$  je funkce definovaná nad oblastí která nás zajímá. Vlnoplochu můžeme popsat diskrétně nebo spojitě, v literatuře označované jako *zonální* a *modální* přiblížení. V prvním případě, tzv. zonálním přiblížení, je funkce  $F(x, y)$  vyjádřena pomocí  $N$  diskrétních hodnot v podoblastech  $(x_i, y_i)$ , pro  $i = 0, \dots, (N-1)$ . Rekonstrukce vlnoplochy je pak řešena pomocí numerické integrace lokálních gradientů vlnoplochy. V druhém, modálním přiblížení je funkce  $F(x, y)$  popsána jako superpozice  $M$  módů, neboli spojitých subfunkcí  $f_i(x, y), i = 0, \dots, (M-1)$ , každý z nich definovaný nad celou oblastí zájmu. Rekonstrukce pak vede na maticové rovnice hledající optimální proložení vlnoplochy pomocí množiny daným funkcí (viz další kapitoly). Pro analýzu aberací se ukazuje jako výhodnější zonální přístup, proto se dále budeme zabývat pouze jím.

Analyticky můžeme vlnoplochu popsat jako superpozici hladkých a spojitých báзовých funkcí  $f_i$ , kde  $f_0$  je konstanta reprezentující rovinnou vlnoplochu. Jednorozměrná reprezentace problematiky je na Obr. 8.

$$\Xi_W = \sum_{i=0}^{M-1} C_i f_i(x, y), \quad \forall (x, y) \supset \text{oblast zájmu} \quad (3.2)$$



Obr.8: Příklad 1D reprezentace vlnoplochy

Můžeme použít vhodné množiny báзовých funkcí, kde parametrem je koeficient  $C_i$ . Z mnoha možných množin ortogonálních funkcí (definovaných nad jednotkovou kruhovou oblastí  $x^2 + y^2 \leq 1$ ) je vhodné použít tzv. Zernikeho reprezentace, kde množina báзовých funkcí je tvořena polynomy (Zernikeho polynomy). Nejčastější aberace jsou v tomto případě popsány pomocí polynomu nízkého řádu. Každý polynom je spojen se specifickou aberací (naklonění, koma, astigmatismus). Zernikeho polynomy s velkou přesností popisují základní Seidelovy aberace. Dobré aproximace vlnoplochy obvykle dosáhneme při použití prvních  $\sim 15$  lineárně nezávislých polynomů.

Vyjadřujeme Rozdíl vlnoplochy  $\Xi_W$  vůči referenční vlnoploše  $\Xi_{W0}$ .

$$W = \Xi_W - \Xi_{W0} = \sum_{i=0}^{\infty} C_i Z_i(\rho, \theta) \quad (3.3)$$

Zernikeho polynomy  $Z_i$  v polárních souřadnicích pak vypadají následovně:

$$Z_i(\rho, \theta) = Z_{n,m}(\rho, \theta) = \begin{cases} R_n^m(\rho) \cos(m\theta) & , m > 0 \\ R_n^m(\rho) \sin(m\theta) & , m < 0 \\ R_n^m(\rho) & , m = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

kde

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! [(n-m)/2 - s]!} \rho^{n-2s}$$

Parametry  $n, m$  musí splňovat následující podmínky:

$m < n$  a  $m$  jsou celá čísla, kde  $n > 0$

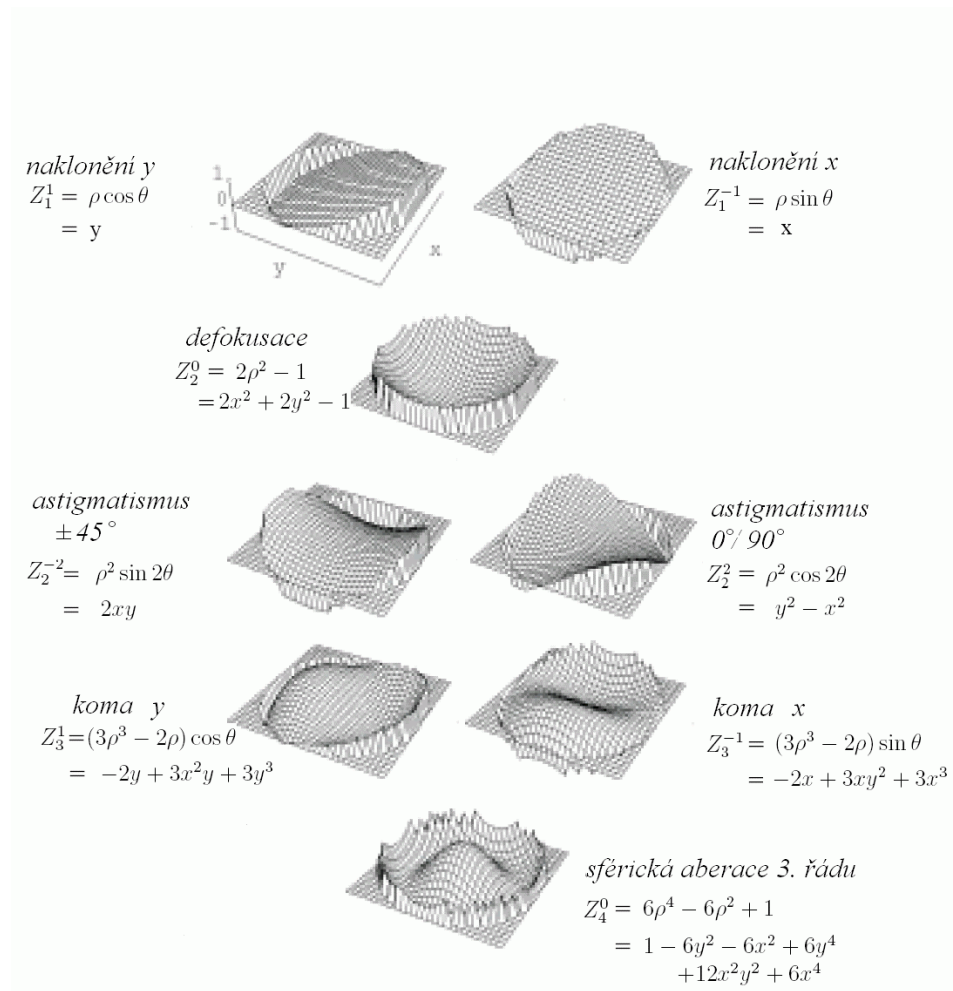
$n$  a  $m$  jsou obě buď sudá nebo obě lichá

pro dané  $n$ , má  $m$  rozsah od  $-n$  do  $n$  s krokem 2

Můžeme tedy provést dekompozici vlnoplochy (nad jednotkovou kruhovou oblastí) do množiny Zernikeho polynomů, které jsou ortogonální a lineárně nezávislé.

$$\Xi(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{\forall m} C_n^m Z_n^m(\rho, \theta) \quad (3.5)$$

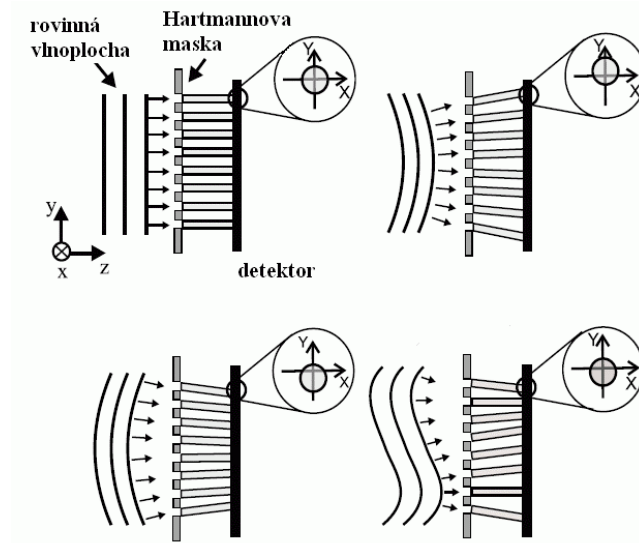
Následující obrázek zobrazuje některé Zernikeho polynomy nízkého řádu.



Obr. 9: Nejobvyklejší aberace a jejich vyjádření

### 3.3.2 Snímání vlnoplochy pomocí Hartmannova testu

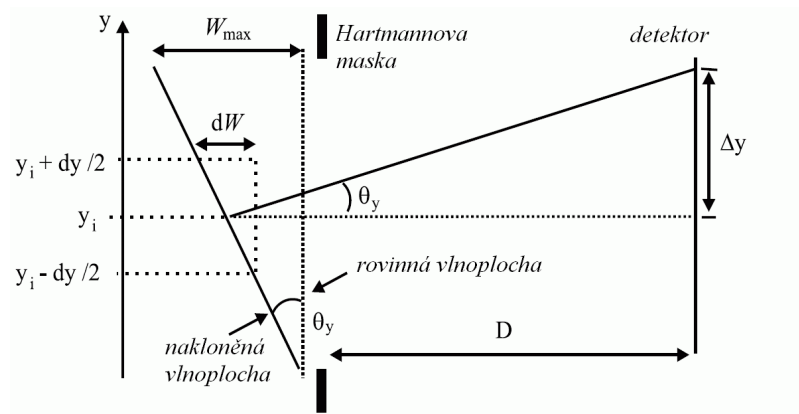
Příchozí světlo procházející Hartmannovou maskou vytváří na detektoru obraz masky (světlo prošlé jedním otvorem vytváří na detektoru obraz, který bude dále nazýván spot). Předpokládáme-li, že rovinná vlnoplocha dopadá kolmo na Hartmannovu masku, jsou středy spotů lokalizovány přesně pod středem otvorů Hartmannovy masky. Pokud je přicházející vlnoplocha deformovaná (případně příchozí svazek světla je konvergentní/divergentní) dochází k posunu spotů. Posun spotů je úměrný lokálnímu naklonění vlnoplochy.



Obr. 10: Posun středů obrazů otvorů Hartmannovy masky

Aberační funkce  $W(x, y)$  definuje rozdíl mezi deformovanou vlnoplochou a referenční vlnoplochou. Pokud předpokládáme že vlnoplocha nemá jiné aberace než naklonění, posun spotu v daném směru od referenční polohy  $(x_i, y_i)$  je dán lokálním nakloněním vlnoplochy v daném směru. Lokální naklonění tedy může rozložit dle rovnice (3.6), kde  $i$  představuje  $i$ -tý spot a předpokládáme že vzdálenost mezi Hartmannovou maskou a detektorem  $D$  je mnohem (řádově) větší než maximální naklonění vlnoplochy  $W_{\max}$  nad aperturou.

$$\left. \frac{dW}{dx} \right|_{(x_i, y_i)} = \tan(\theta_{x_i}) = \frac{\Delta x_i}{D} \quad , \quad \left. \frac{dW}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} = \tan(\theta_{y_i}) = \frac{\Delta y_i}{D} \quad (3.6)$$

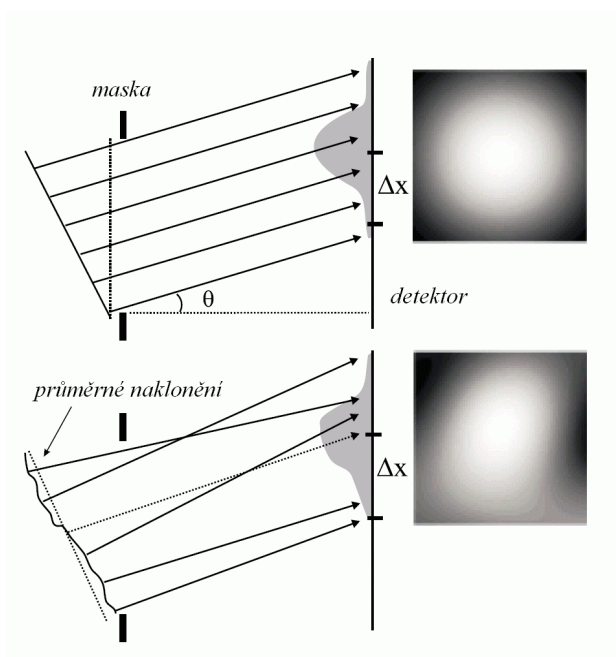


Obr. 11: Vztah mezi nakloněním vlnoplochy a aberací paprsku pro jeden otvor Hartmannovy masky

Reálně dochází k deformaci a posunu obrazu otvoru, mění se prostorové rozložení intenzity světla. Posun středu spotu je tak možno popsat pomocí rovnic (3.7).

$$\Delta x = \frac{\iint H(x, y) x dx dy}{\iint H(x, y) dx dy}, \quad \Delta y = \frac{\iint H(x, y) y dx dy}{\iint H(x, y) dx dy} \quad (3.7)$$

kde funkce  $H(x, y)$  popisuje rozložení intenzity světla.



Obr. 12: Průměrné naklonění a profil intenzity světla pro jeden otvor.



Analýzou posunů středů otvorů můžeme určit koeficienty příslušných Zernikeho polynomů tvořících vlnoplochu. Tyto koeficienty přímo udávají velikost jednotlivých aberací.

### 3.3.3 Algoritmus rekonstrukce vlnoplochy

Hartmannovou maskou maskou umístěnou ve vzdálenosti  $D$  od detektoru prošla neznámá vlnoplocha, která způsobila posunutí středů spotů. Vstupní informací je relativní posunutí středu  $i$ -tého spotu  $\Delta x_i, \Delta y_i$  vůči referenční poloze  $x_i, y_i$ . Jak už bylo uvedeno v úvodu této kapitoly, budeme se zabývat pouze modálním přiblížením.

Z rovnice (3.3) můžeme lokální naklonění deformované vlnoplochy vyjádřit jako superpozici  $M$  Zernikeho polynomů a to následovně:

$$\left. \frac{dW}{dx} \right|_{(x_i, y_i)} = \sum_{k=0}^{M-1} C_k \left. \frac{dZ_k}{dx} \right|_{(x_i, y_i)}, \quad \left. \frac{dW}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} = \sum_{k=0}^{M-1} C_k \left. \frac{dZ_k}{dy} \right|_{(x_i, y_i)} \quad (3.8)$$

Deformace vlnoplochy je popsána pomocí  $M$  koeficientů příslušných Zernikeho polynomů. Pro Hartmannovu masku s  $N$  otvory pak hledáme řešení následující maticové rovnice (pro neznámé koeficienty  $C_k$ ).

$$D^{-1} \begin{pmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \vdots \\ \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \vdots \\ \Delta x_{N-1} \\ \Delta y_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left. \frac{dZ_0}{dx} \right|_0 & \left. \frac{dZ_1}{dx} \right|_0 & \cdots & \left. \frac{dZ_{M-1}}{dx} \right|_0 \\ \left. \frac{dZ_0}{dy} \right|_0 & \left. \frac{dZ_1}{dy} \right|_0 & \cdots & \left. \frac{dZ_{M-1}}{dy} \right|_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{dZ_0}{dx} \right|_i & \left. \frac{dZ_1}{dx} \right|_i & \cdots & \left. \frac{dZ_{M-1}}{dx} \right|_i \\ \left. \frac{dZ_0}{dy} \right|_i & \left. \frac{dZ_1}{dy} \right|_i & \cdots & \left. \frac{dZ_{M-1}}{dy} \right|_i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left. \frac{dZ_0}{dx} \right|_{N-1} & \left. \frac{dZ_1}{dx} \right|_{N-1} & \cdots & \left. \frac{dZ_{M-1}}{dx} \right|_{N-1} \\ \left. \frac{dZ_0}{dy} \right|_{N-1} & \left. \frac{dZ_1}{dy} \right|_{N-1} & \cdots & \left. \frac{dZ_{M-1}}{dy} \right|_{N-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ \vdots \\ C_k \\ \vdots \\ C_{M-2} \\ C_{M-1} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Označíme-li vektor lokálních naklonění  $\mathbf{s}$ , matici derivací Zernikeho polynomů v jednotlivých bodech  $\mathbf{B}$  (tzv. rekonstrukční matice), vektor koeficientů Zernikeho polynomů  $\mathbf{c}$ , rovnici (3.9) můžeme symbolicky zapsat takto:

$$\mathbf{s} = \mathbf{B} \mathbf{c} \quad (3.10)$$

Exaktní řešení má tato rovnice pouze pro  $M = 2N$ , řešení pak má tvar:

$$\mathbf{c} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{s}, \quad (\mathbf{B} \text{ není singulární}) \quad (3.11)$$

Pokud má vektor  $\mathbf{s}$  menší dimenzi než vektor  $\mathbf{c}$ , máme více neznámých než rovnic a soustava rovnic buď řešení nemá nebo má několik řešení, které mohou být nalezeny pomocí singular value decomposition (SVD). Nejobvyklejší je však případ kdy dimenze vektoru  $\mathbf{s}$  je výrazně větší než dimenze  $\mathbf{c}$  (množství otvorů Hartmannovy masky převyšuje počet Zernikeho polynomů, jímž chceme popsat vlnoplochu). Striktně řečeno máme větší množství (lineárně nezávislých) rovnic než neznámých, takový systém rovnic nemá exaktní řešení. Můžeme však provést odhad nejlepšího řešení (vektor  $\mathbf{c}_f$ ) v rovnici (3.12).

$$\mathbf{s} \approx \mathbf{B} \mathbf{c}_f \quad (3.12)$$

Jednou z nejlepších aproximací řešení je použít metodu nejmenších čtverců, která minimalizuje sumu čtverců rozdílů mezi vektory na levé a pravé straně rovnice (3.12). Což je ekvivalentem k řešení rovnice (3.13),

$$[\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{s} = \mathbf{c} \quad (3.13)$$

kde  $[\mathbf{B}^T \mathbf{B}]^{-1} \mathbf{B}^T$  je tzv. pseudo-inverzní matice rekonstrukční matice  $\mathbf{B}$ . Pokud je  $(\mathbf{B}^T \mathbf{B})$  singulární nebo téměř singulární je nutno použít jiných metod jako např. SVD. Pseudo-inverzní matici je třeba určit jen jednou pro dané měření. Množství použitých Zernikeho polynomů (módů) je obvykle mnohem menší než počet zón v případě zonálního přiblížení. Vlastní numerický výpočet je tak v případě modálního přiblížení obvykle rychlejší.

Rekonstruovaná vlnoplocha není přesnou reprodukcí testované vlnoplochy. Je to způsobeno řadou chyb jako např. nepřesnost určení středu spotů (šum), nevhodná množina báзовých funkcí, neadekvátní počet módů, prostorové rozložení a velikost otvorů Hartmanovy masky a v neposlední řadě problémy které sebou přináší numerický výpočet (problematika numerické stability výpočtu [14,30-32]). Při menším počtu módů je obvykle rekonstrukční chyba menší. Bylo ukázáno [30-32], že inverze matice pomocí metody nejmenších čtverců vykazuje dobrou numerickou stabilitu při dostatečném množství spotů, rovněž jejich rozložení do ortogonální sítě přispívá ke zvýšení stability výpočtu. Dobře zvolený modální rekonstruktor je obvykle zatížen menší chybou než odpovídající zonální rekonstruktor, zejména při malém počtu módů. Je také mnohem flexibilnější, můžeme snadno měnit množinu báзовých funkcí, množství módů, počet spotů a jejich geometrii.

## **4 Testování optiky – realizace testů**

### **4.1 Metodika testování**

- Spektrální propustnost čoček byla testována na prototypch (INFN Trieste, CERN), tato práce se touto problematikou (včetně výběru a kontroly kvality antireflexních vrstev) dále nezabývá.
- Kvalita povrchu čoček byla testována vizuální kontrolou při montáži, případně pomocí mikroskopie.
- Pro testování správné justace a kvality čoček byl navržen a aplikován následující postup.

### *Přípravná fáze*

Cílem bylo sestavit a otestovat aparaturu využívající Hartmannova testu, simulovat Hartmannův test v programu ZEMAX pro všechny fáze měření a využít je jako reference. Výsledkem této fáze byla plně funkční aparatura umožňující testování použitých čoček.

#### *1. Test prototypů čoček*

Prototypy prizmatických čoček byly testovány ve spolupráci s Vývojovou optickou dílnou AV ČR v Turnově (VOD). Zároveň toto měření sloužilo jako srovnávací test Hartmannovy metody (resp. našeho testovacího aparátu) a jiných metod, které jsou k dispozici ve VOD (interferenční metody, ...). Prizmatické čočky byly také nezávisle testovány laboratoří Sincrotrone Trieste (Itálie). Výstupem byly informace o kvalitě prototypů čoček (a jejich schválení do výroby).

Prototypy asférických čoček byli opět testovány ve spolupráci s VOD AV ČR. Hartmannův test v tomto případě sloužil jako primární zdroj informací o prototypu. Důvodem je nesnadnost měření asférického povrchu pomocí konvenčních metod. Výstupem byla opět charakterizace prototypů čoček (a schválení konkrétního výrobce).

#### *2. Test kvality prizmatických čoček*

V průběhu výroby prizmatických čoček byla každá čočka individuálně testována pomocí Hartmannova testu přímo u výrobce. Bylo třeba velmi rychle vybrat vhodné čočky, které byly nalepeny na rámy. Čočky byly srovnávány jak s teoretickou referencí (simulace v ZEMAX) tak s prototypy. Výstupem byl seznam konkrétních čoček (vyhovujících požadavkům) a plán jejich nalepení.

#### *3. Test justace prizmatických čoček*

Rám s nalepenými čočkami byl upevněn na polohovatelný stůl, umožňující jeho přesně definovaný pohyb (ve třech osách) vůči Hartmannově testovacímu aparátu (HTA). Jedna z čoček byla vybrána jako referenční, byla změřena její poloha vzhledem k HTA. Stůl poté zajistil přesunutí HTA k dalším čočkám a změření relativní změny jejich polohy vůči referenci (decentrace, naklonění, defokusace,...). Výstupem měření byla informace o polohách jednotlivých čoček v rámu (vzhledem k tomu, že přesnost polohy čoček může být

velmi dobře predikována z předchozího testu, získali jsme tak poměrně dobrou charakteristiku kvality nalepení čoček a mechaniky vlastního rámu)

#### *4. Test kvality a justace asférických čoček*

Čočky byly mechanicky upevněny do svých držáků. Každý z držáků s čočkou byl vložen do HTA, měřena byla kvalita čoček a přesnost jejich umístění v držácích. Jako reference sloužily jak teoretické čočky (simulace), tak prototypy v konkrétních držácích. Tato konfigurace umožnila získat informace nejen o vlastních čočkách, ale i o přesnosti výroby vlastních držáků (což se ukázalo jako klíčové – viz. kapitola 4.9 ).

#### *5. Test kompletních teleskopů*

Po sestavení byly rámy s kompletními teleskopy umístěny na polohovatelný stůl, každý z teleskopů tak byl testován za stejných podmínek. Detektor HTA byl umístěn do držáku asférické čočky, v místě do kterého byl později připevněn fotonásobič. Tento test tedy nejlépe simuluje podmínky jaké panují při provozu detektoru. Výsledkem bylo vyhodnocení kvality zobrazení každého z teleskopů (získáváme kvalitativně novou informaci – zda jsou čočky ve správné pozici vůči sobě a vůči detektoru). Vzhledem k tomu, že držáky asférických čoček mohou být snadno demontovány, bylo možné provést drobné korekce zobrazení teleskopů vykazujících největší odchylky od požadovaných hodnot (viz. kapitola 4.11).

## **4.2 Testovací kritéria**

Problematika vlivu jednotlivých vad na optický systém byla řešena D. Kramerem [7] při návrhu. Analýza byla prováděna v ZEMAXu (v sekvenciálním módu), byl sledován vliv změny parametrů na kvalitu zobrazení. Zároveň byly provedeny simulace pomocí Monte Carlo metody (použito bylo normální rozdělení chyb pro všechny definované parametry). Výsledkem byl seznam přípustných tolerancí, které mají maximálně 10 % vliv na velikost spotu a jeho posun.

POVRCH 1	Nominální hodnota	Tolerance ±	ΔRMS[μm]	ΔCENY[μm]	ΔCENX[μm]
Rádus	54.94 mm	0.5mm	3.3	0	0
Nerovnoměrnost povrchu		10krouž.	0.08	0	0
Tloušťka	20.813 mm	0.1mm	0.3	1	0
Náklon		0.02°	0.6	2.1	2.1
Decentrace		0.1mm	3.1	11	11
Index		0.001	0.5	1.4	0
POVRCH 2					
Rádus	∞	50krouž.	0.2	0	0
Nerov. povrchu		10krouž.	0.08	0	0
Náklon	5°	0.1°	2	13.3	13.3
POVRCH 3					
Rádus	20.696 mm	0.06mm	13	2.8	0
Asf. koeficient.	-6.13885E-05	5e-7m <sup>-3</sup>	15	2.3	0
Tloušťka	19.420 mm	0.1mm	14	0.3	0
Náklon		0.02°	0.04	6	6
Decentrace		0.05mm	4	29	29
Index		0.001	14	2.7	0
POVRCH 4					
Rádus	-24.964 mm	0.06mm	11	2.4	0
Nerov. povrchu		10krouž.	0.4	0.2	0
Náklon		0.02°	0.5	5.7	5.6
Decentrace		0.05mm	2.7	32	32
RSS			31	48	47

*Tabulka 1: Tolerance pro výrobu čoček a jejich vliv na kvalitu zobrazení.  
převzato z [7]*

RSS představuje odmocninu ze sumy čtverců jednotlivých vad, ΔCENX je způsobený posun spotů ve směru x (počítáno pro vlnovou délku 300 nm). Některé vady v předchozí tabulce jsou redundantní – jde o naklonění a decenteraci. Naklonění sférického povrchu je možno interpretovat jako jeho posunutí. Zadávací listy pro výrobce čoček – viz přílohy 2,3.

PRIZMATICKÁ čočka	Nominální hodnota	Tolerance $\pm$	$\Delta$ RMS[ $\mu$ m]	ACENY[ $\mu$ m]	ACENX[ $\mu$ m]
Náklon	0	0.05°	0	1.4	1.4
Decentrace	0	100 $\mu$ m	0	11	11
Vzdálenost (vzhledem k PMT)	75.81mm	500 $\mu$ m	3.3	5.4	0
ASFÉRICKÁ čočka					
Náklon	0	0.05°	0	12	12
Decentrace	0	50 $\mu$ m	1	61	61
Vzdálenost (vzhledem k PMT)	26.84mm	100 $\mu$ m	14	1.2	0
RSS			14.4	63	63

*Tabulka 2: Montážní tolerance čoček a jejich vliv na kvalitu zobrazení.  
převzato ze [7]*

Bylo rozhodnuto zaměřit se pouze na vady které mají největší vliv na kvalitu zobrazení. Je zřejmé, že naše požadavky na kvalitu povrchu jsou řádově nižší než je běžné v optickém průmyslu. Zejména to platí pro prizmatickou čočku, kdy byli použity standardní techniky výroby, a nebyly očekávány problémy s kvalitou čoček. V tomto případě tak hlavní kvalitativní parametr charakterizující čočku je náklon a decentrace povrchů (vzhledem k ose) a přesnost s jakou je vyroben klín. Ostatní testy (rovinnost povrchu, rádius, přesnost tvaru sférické plochy jsou pouze doplňkové a je možno je provést pouze na prototypch a několika vzorcích z výroby). Asférická čočka rozhodně nepředstavuje standardní výrobek, zde je třeba garantovat pro každou čočku tvar asférického povrchu a náklon a decentraci obou povrchů.

Naprosto zásadní je však zajistit správnou pozici obou čoček v teleskopu, s největším důrazem na náklon a decentraci asférické čočky. Vzhledem k velice komplexní mechanice uchycení čoček, jejich držáků a vlastních rámců k sobě, garantovat umístění asférické čočky s tolerancí 50  $\mu$ m pro decentraci (a 0.05° pro naklonění) není triviální. Přesnost výroby mechanických dílů se tak také stává jedním z podstatných parametrů pro kvalitu zobrazení optické soustavy a je také předmětem testování. Detaily viz příslušné kapitoly věnující se jednotlivých fázím testu.

### 4.3 Softwarové simulace

Pomocí programu ZEMAX bylo simulováno jak se jednotlivé vady projevují v Hartmannově testu. Zároveň tyto simulace sloužily pro optimalizaci Hartmannova testu – geometrie otvorů, vlnová délka zdroje světla, vhodná vzdálenost detektoru od testované čočky.

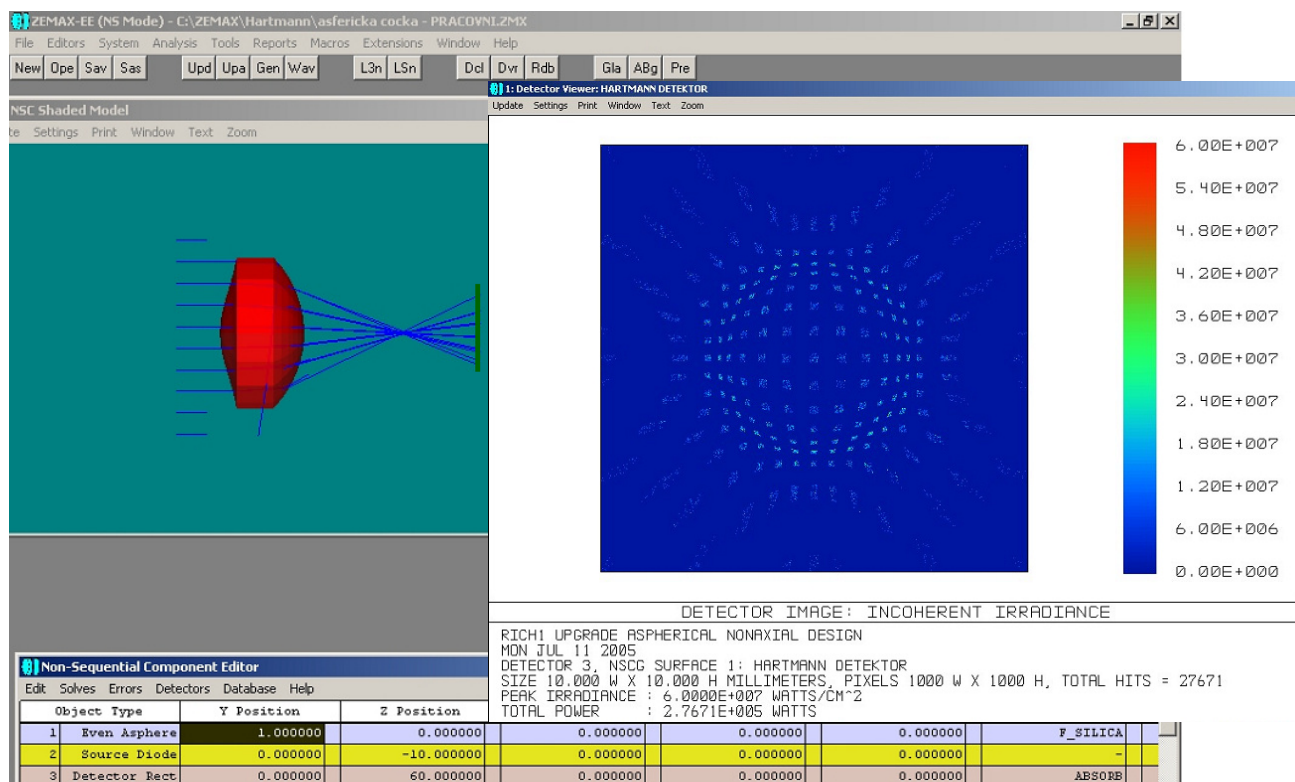
Jako zdroj světla bylo použito pole diod ve vzdálenosti 100m od testovaných čoček. Divergence svazku byla určena na  $0.00028646^\circ$ , což simuluje Hartmannovu masku se čtvercovými otvory (rozteč a velikost otvorů definována polem diod) a prakticky paralelním svazkem světla.

Byl analyzován vliv naklonění a decentrování čoček; vliv decentrování, naklonění a změny pozice (vůči detektoru) jednotlivých čoček v teleskopu; vliv naklonění a decentrace jednotlivých povrchů v čočce. Pro analýzu bylo použito 100 000 paprsků (pro vlnovou délku odpovídající zdroji světla použitému při testování – viz. následující kapitola, ale i jiné). Detektor (1600x1200 pixelů) byl umístěn v několika (typicky 4) vzdálenostech od testované čočky. Pro vyhodnocení středu spotů byl použit stejný algoritmus jako při vlastním testování. Výsledkem je matice středů spotů ve daných (4) pozicích. Pomocí metody nejmenších čtverců byla definována trajektorie paprsků odpovídajících středům spotů. V prostředí MATLAB byl realizován program který po zadání reálné vzdálenosti detektoru od čočky a dané vady, vytvořil matici očekávaných posunutí středů spotů (vůči spotům odpovídajícím ideální čočce bez dané vady).

Pro rychlou kontrolu čoček během montáže byli vytvořeny matice středů spotů zohledňující všechny vady s jejich tolerancemi, resp. příslušné paprsky. Vyhodnocením reálného obrazu z detektoru a jeho porovnáním se simulací tak bylo možno okamžitě rozhodnout zda jsou tolerance překročeny nebo nikoli. Dekompozice na jednotlivé vady pak byla prováděna především pro čočky blížící se tolerancím nebo je překračující.

Program ZEMAX zároveň umožňuje analýzu deformace vlnoplochy po průchodu testovanou optikou. Bylo tak možno přímo získat hodnoty koeficientů Zernikeho polynomů pro dané vady.





Obr. 13: Příklad simulace v nesekvenciálním módu v programu ZEMAX  
 nakloněná čočka; deformovaný obraz otvorů Hartmannovy masky

#### 4.4 Testovací aparatura

Jak bylo uvedeno Hartmannův test se skládá ze zdroje paralelního svazku světla, který prochází Hartmannovou maskou, testovaným objektem a dopadá na detektor.

Jako zdroj světla bylo použito LED diody (GM katalog: 511-592: 3,3V ; 30mA ; vyzařovací úhel 35° ; vlnová délka 470nm). Byl vyroben stabilizovaný zdroj proudu napájející diodu (umožňující regulaci intenzity světla). Plastová optika diody byla zbroušena do roviny a vyleštěna. Získali jsme tak bodový zdroj světla. Dioda je umístěna v držáku s bajonetovým uzávěrem (který umožňuje nastavit polohu a naklonění diody v držáku). Držák s diodou je mechanicky připevněna k dlouho-ohniskovému teleobjektivu (VIVITAR 400mm ; 1:5,6), který slouží k paralelizaci svazku světla (bylo nutno vybrat a otestovat objektiv s minimálními vadami, které by negativně ovlivnili testování).

Na druhý konec teleobjektivu je přišroubována objímka, do které se vkládají Hartmannovy masky. Byla použita technologie pro výrobu desek plošných spojů a pomocí

CNC vrtačky byly vyrobeny masky s kruhovými otvory rozmístěnými do čtvercové sítě s roztečí  $5\text{ mm}$  ;  $3,5\text{ mm}$  ;  $1,8\text{ mm}$  (a průměry  $0,8\text{ mm}$  ;  $0,7\text{ mm}$  ;  $0,6\text{ mm}$  ) – viz příloha 5.

Jako detektor byla použita CCD kamera LUMENERA LU275C (1600x1200 pixelů, velikost pixelu  $4,2\text{ }\mu\text{m}$  , 1/2" CMOS čip, port USB 2.0 , možnost snímání až 10fps). Jednou z hlavních výhod této kamery je, že výrobce dodává knihovny funkcí, které jsou přidány jako nové komponenty do vývojového prostředí (DELPHI, Visual C++,....) a umožňují snadné psaní vlastních programů komunikujících s CCD kamerou.

Mechanická konstrukce Hartmannova testu je tvořena základovou deskou (dural), v ní jsou upevněny 4 ocelové pilíře. Po těchto pilířích pojíždí justační stolek s CCD kamerou (možnost změny vzdálenosti kamera-testovaná optika, naklánění kamery a posun kamery po justačním stolku). K pilířům je připevněn mezikus (dural) do kterého se vkládá testovaná optika. K tomuto mezikusu je přišroubován teleobjektiv s Hartmannovou maskou na jednom konci a držákem LED diody na druhém. Tato konfigurace byla zvolena z důvodu nutnosti testovat nejen samostatnou optiku (vkládání čoček do HTA), ale později rozdělit HTA na dvě části - zdroj paralelního svazku s Hartmannovou maskou a samotný detektor - a obě tyto části nezávisle připevnit na polohovatelný stůl (test justace prizmatických čoček a test kompletních teleskopů).



Obr. 14 Mechanika Hartmannovy testovací aparatury

#### 4.5 Softwarová implementace

Pro komunikaci s kamerou byl vytvořen jednoduchý program v prostředí DELPHI, který ukládá obrázky z CCD kamery na disk ve formě bitmapy. Komunikace probíhá pomocí portu USB 2.0.

Vlastní zpracování dat bylo vytvořeno v prostředí MATLAB 6.5. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu zjednodušené implementace programu a využívá především Image processing toolboxu MATLABU (jednou z dalších výhod použití MATLABU je snadnější řešení problémů s numerickou stabilitou výpočtů).

Byla vytvořena sada funkcí řešící jednotlivé úkoly jako načtení obrázku do MATLABU (reprezentace pomocí matice), konverze mezi formáty, vhodná filtrace obrazu, získání referenčních hodnot z databáze simulací, odstranění nevhodných objektů, zobrazení výsledků, .... Jádrem programu jsou však dvě funkce řešící výpočet středů spotů a provádějící dekompozici do dané množiny bazových funkcí pomocí metody nejmenších čtverců.

Po provedení řady testů se jako nejefektivnější algoritmus pro výpočet středu spotů ukázal následující postup. Obrázek je nejprve filtrován (funkce *imfilter*), poté je provedena konverze z RGB do binární formy pomocí pevně stanoveného (a vhodně zvoleného) prahování – funkce *im2bw*), opět dochází k filtraci objektu. Dále je proveden výpočet vzdálenostní funkce (*bwdist*), kterou je možné zjednodušeně popsat jako ekvidistanty vzniklé kolem rezidua segmentovaných objektů (funkce eroze aplikovaná na objekt dokud nedojde k jeho redukci na nejmenší strukturní element). Objekty na obrázku jsou spočítány a označeny (pomocí funkce *bwlabel*). Jako klíčová je poté použita funkce *regionprops*, umožňující získat informace o jednotlivých segmentovaných objektech na obrázku včetně příslušného těžiště. Souřadnice těžišť oblastí – středů spotů – jsou pak uloženy do matice a použity pro další výpočty. Bližší informace včetně matematického zpracování problematiky a přesnosti dané metody viz. [26]. Výsledky analýzy středů spotů získané pomocí různých testovaných algoritmů se lišily obvykle o jednotky pixelů. Což pro analýzu tvaru vlnoplochy v našem případě představuje zanedbatelný rozdíl.

Funkce řešící dekompozici vlnoplochy do množiny bazových funkcí používá algoritmus popsáný v kapitole 3.3.3. Máme definovanou množinu bazových funkcí včetně jejich derivací. S pomocí matice těžišť je naplněna rekonstrukční matice **B**, a poté je

pomocí funkce *pinv* určena pseudo-inverzní matice k matici **B**. Zbývá vypočítat koeficienty příslušných Zernikeho polynomů dle rovnice 3.13.

Výsledky jsou zobrazeny v grafické i textové podobě – viz. Obr 15,16. Byli vytvořeny verze programu umožňující detailní analýzu tvaru vlnoplochy, ale i zjednodušené předběžné vyhodnocení – v tomto případě je pouze sledováno zda jsou středy spotů v mezích příslušných tolerancí.

Pomocí programu ZEMAX byly vytvořeny datové soubory simulující různě deformované vlnoplochy (se známými koeficienty příslušných Zernikeho polynomů). Dále byla použita sada simulovaných čoček s různými vadami (poděkování VOD AV ČR). Tyto datové soubory byly použity pro testování vytvořeného programu. Bylo ověřeno, že použitý algoritmus rekonstrukce vlnoplochy pracuje velmi dobře při vhodně zvoleném počtu Zernikeho polynomů (přesnost určení koeficientů pak byla lepší než 1 %). Chyba v charakterizaci vlnoplochy (RMS hodnota) kolísala, v závislosti na vhodnosti dané množiny báзовých funkcí, mezi 10-200  $\mu m$ . Pro správnou analýzu testovaných čoček se ukázalo jako zásadní mít dodatečnou informaci o očekávaném charakteru deformace vlnoplochy, což v případě testované optiky bylo splněno. Bližší informace o přesnosti použití Zernikeho polynomů je možno nalézt v [27].

## 4.6 Testování prototypů

### 4.6.1 Test prototypů prizmatických čoček

Jako výrobce prototypů prizmatických čoček byla předběžně vybrána firma SILO (Florence, Itálie), která dodala 5 prototypů čoček. Ve spolupráci s VOD AV ČR, Turnov byly tyto prototypy testovány interferometrickými metodami.

Pomocí sféro-interferometru (FISBA OPTIK FST H100) byla testována kvalita sférického povrchu čoček. Pro všechny prototypy byla odchylka od nominální hodnoty (rádius 54,94 mm) menší než 0,2 mm (požadovaná tolerance  $\pm 0,5$  mm). Nerovnoměrnost povrchu byla ve všech případech menší než  $\frac{\lambda}{10}$  PV (tolerance  $\pm 1,5 \lambda$ ).

Pomocí Fizeau interferometru (výroba VOD, Turnov) byla testována kvalita rovinného povrchu, pro všechny testované prototypy byly odchylky od rovinného povrchu menší než  $\frac{\lambda}{4}$  PV (tolerance  $\pm 1,5 \lambda$ ).

Mechanické rozměry byli testováni pomocí komparátoru se setinovou přesností. Mechanické rozměry všech prototypů byli v tolerancích (nejčastěji  $\pm 0,1 \text{ mm}$ ), v několika případech se však dovoleným tolerancím přiblížily.

Byli vyrobeny držáky prototypových čoček, které představují část rámu pro nalepení čoček (a simulují tak použité upevnění). Čočky byly vloženy do držáků, byla zvolena stejná metoda jako při pozdějším lepení – jeden z rohů držáku byl zvolen jako referenční a čočka byla přitlačena k tomuto rohu. Držák s čočkou byl vložen do HTA a vyhodnocen. Po provedené analýze se jako zcela dominantní vada projevila decentrace (resp. naklonění), způsobená různými mechanickými rozměry čoček. HTA vyhodnotila decentraci ve všech případech v mezích tolerancí (s maximem pro prototyp č.4 vykazující vady odpovídající decentraci o  $0,07 \text{ mm}$ ), což bylo ve velmi dobré shodě s výsledky získanými z mechanických měření.

Výsledky získané laboratoří Sincrotrone, Trieste potvrdily nerovnoměrnost sférického i rovinného povrchu menší než  $50 \text{ nm PV}$ . Jak už bylo uvedeno další testy (řešící např. spektrální propustnost) zde nejsou zmíněny.

Prototypy dodané výrobcem, s výjimkou mechanických rozměrů, vysoce překračovali požadovanou kvalitu. Výroba čoček byla zadána společnosti SILO. Různé mechanické rozměry čoček po upevnění (a následujícím nalepení) mohou způsobit decentraci (resp. naklonění) blížící se dovoleným tolerancím. Bylo ověřeno že HTA je schopna tyto vady efektivně měřit. Dále pomocí justačního stolku bylo ověřeno že HTA je schopen měřit definované naklonění a decentraci čočky s požadovanou přesností.

#### **4.6.1 Test prototypů asférických čoček**

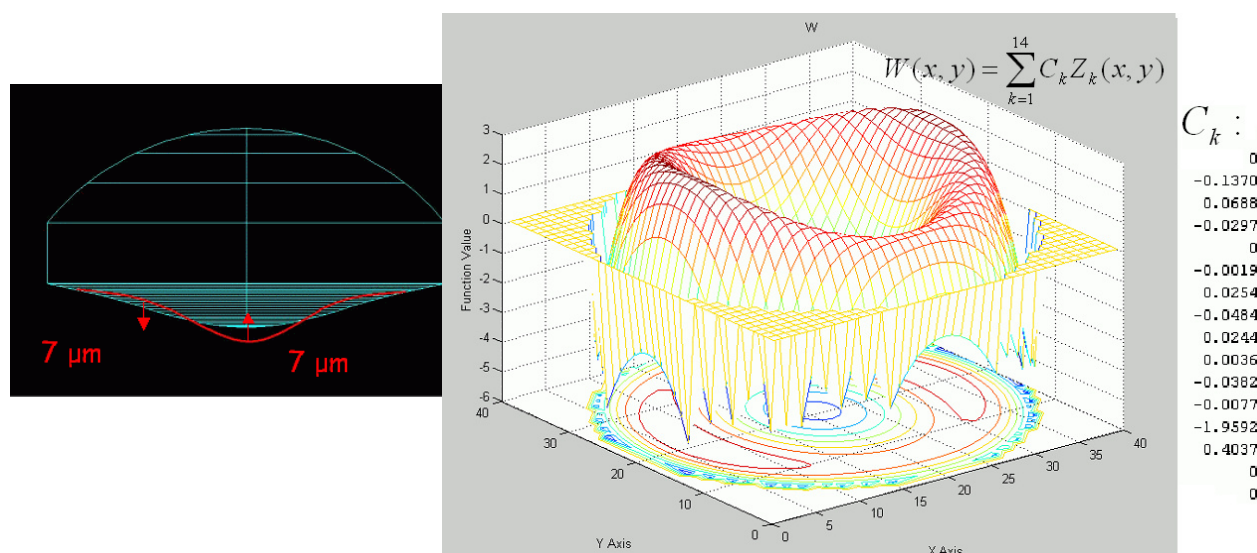
Výroba požadovaného asférického povrchu nepatří mezi běžné optické technologie. Při dané maximální ceně byly pro nás přijatelné nabídky firem: SILO (Florence, Itálie), Tecnottica Consonni (Lecco, Itálie), ASPHERICON (Jena, Německo). Každá ze společností dodala několik prototypů, které byly testovány ve spolupráci s VOD AV ČR.

Kvalita sférického povrchu byla testována pomocí sféro-interferometru ve VOD (FISBA OPTIK FST H100). Sférický povrch byl ve všech případech vyroben s řádově vyšší přesností než byla požadována.

Asférický povrch není snadné testovat pomocí obvyklých metod, proto pro vyhodnocení kvality prototypů byla jako primární metoda použita HTA. Asférická čočka byla upevněna na justážní stolek a analyzována. Jako základní reference bylo použito ideální čočky bez vad simulované v ZEMAXu.

Prototypy vyrobené firmou Tecnottica Consonni vykazovali jako dominantní vadu naklonění (detekováno jako naklonění vlnoplochy), které pro 3 čočky z 5 testovaných překračovalo dovolené tolerance. Tento náklon nebyl způsoben chybnou justací čoček. Tyto prototypy byly HTA vyhodnoceny jako nevyhovující. Sférický povrch byl velmi dobře charakterizován pomocí sféro-interferometru. Za pomoci dodatečných simulací v ZEMAXU tak bylo možno zjistit, že tato vada je velmi pravděpodobně způsobena faktem, že osa sférického povrchu není totožná s osou asférického povrchu. Po konzultaci s výrobcem se ukázalo, že sférický povrch čočky je vyráběn jedním strojem, poté je čočka upevněna do druhého stroje který vyrábí asférický povrch.

U prototypů firmy SILO byla charakteristická deformace vlnoplochy, zobrazená na Obr.15 (zde je zároveň vidět jak vypadá grafický výstup použitého softwaru). Na tento fakt jsme byli upozorněni výrobcem už při dodání prototypů, důvodem byl jiný tvar asférického povrchu. HTA změnu tvaru odhalil a pomocí dodatečných simulací v ZEMAXU (sférický povrch opět precizně změřen pomocí sféro-interferometru) bylo možno potvrdit, že deformace vlnoplochy měřená HTA je v dobré shodě s údaji výrobce.



Obr. 15: Příklad deformace tvaru čočky a způsobená deformace vlnoplochy analyzovaná HTA (deformovaná vlnoplocha po odstranění defokusace – koeficient  $C_5$  nastaven na 0)

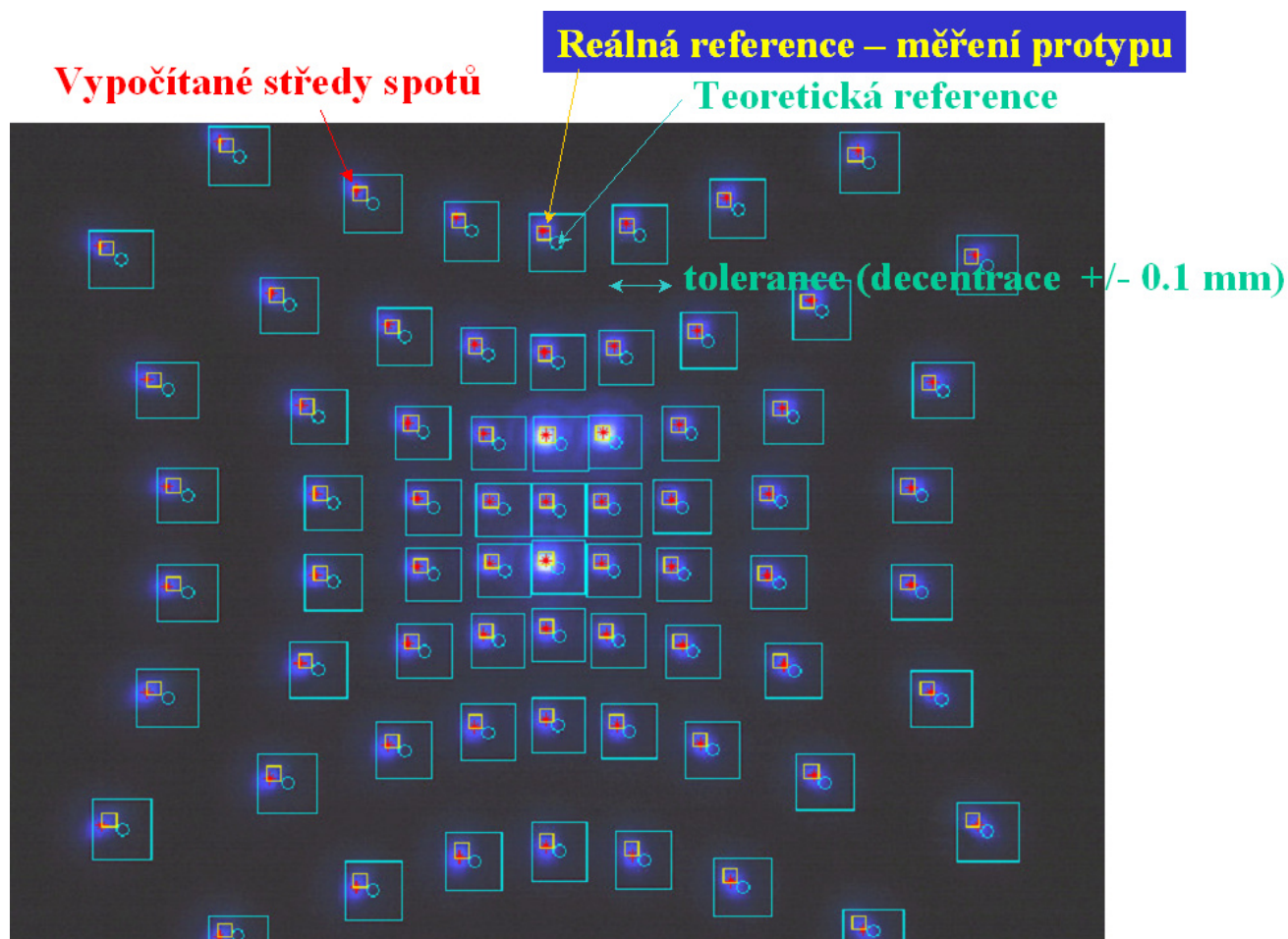
Prototypy firmy ASPHERICON se ukázali jako plně vyhovující – pro všechny prototypy byl posun středů spotů (a deformace vlnoplochy) bezpečně v mezích tolerancí. Výroba čoček byla zadána firmě ASPHERICON (antireflexní vrstva  $MgF_2$  však byla realizována firmou SILO).

HTA se ukázala jako plně funkční pro vyhodnocení zda jsou prototypy vyrobeny s námi požadovanými tolerancemi. Dokonce s její pomocí bylo možno nezávisle identifikovat slabá místa při výrobě čoček.

#### 4.7 Test kvality prizmatických čoček

Přímo u výrobce bylo testováno 690 prizmatických čoček. Jak odhalilo testování prototypů, hlavním testovaným kritériem byla mechanická přesnost výroby čoček. Opět byl uplatněn postup použitý později při lepení čoček – každá z čoček byla vložena do držáku a přitlačena do vybraného referenčního rohu. Získaný obraz byl porovnán jak s teoretickou referencí (simulace v ZEMAXu) tak s reálnou referencí – jeden z prototypů (jehož parametry byly precizně změřeny dříve). Analýza deformace vlnoplochy ukázala, že dominantní vadou je naklonění (ostatní deformace vlnoplochy byly vůči ní zanedbatelné). Různé rozměry jednotlivých čoček způsobily, že po přitlačení čočky do referenčního rohu se osa čočky nacházela na různých místech. Pro rychlé vyhodnocení čoček byla použita zjednodušená verze Hartmannova testu (typický výstup viz Obr.16). Nejprve byly do programu načteny obě reference, dále příslušné tolerance. Bylo zjišťováno zda středy spotů testované čočky leží v požadovaném tolerančním poli (čočka je vyhovující).





Obr. 16: Příklad výstupu předběžné analýzy

Dekompozice na jednotlivé vady a analýza tvaru vlnoplochy byla provedena následně. Řada čoček byla vyřazena z důvodu výskytu mechanických defektů – vyštíplé oblasti, velké škráby,... . Bylo rozhodnuto vyřadit všechny čočky, kde velikost poškozené oblasti přesahovala 1 mm.

Zejména použití zjednodušené verze HTA pro předběžnou analýzu (nebylo nutné provádět analýzu deformace vlnoplochy pro každou čočku) bylo možné během necelých třech týdnů vyhotovit seznam 576 čoček, které nejlépe splňují naše požadavky (Jsou bezpečně v mezích tolerancí). Vybrané čočky byly nalepeny do rámu (provedeno v SILO). Záměrně bylo rozhodnuto rozmístit čočky do rámců náhodně (a nelepit úmyslně do některých oblastí čočky nejlepší kvality).



#### 4.8 Test justace prizmatických čoček

Měřicí aparatura byla v tomto případě nainstalována na frézce v CERN. V čase vyhrazeném pro testování nebylo možné vyvíjet polohovatelný stůl. Bylo rozhodnuto využít stávající zařízení, které umožňovalo posouvat vůči sobě HTA a rám s nalepenými čočkami s dostatečnou přesností.

Na obráběcí hlavu frézky byla namontována pomocná struktura se zdrojem paralelního svazku světla s Hartmannovou maskou a detektorem (CCD kamerou). Obráběcí hlava umožňovala pohyb v ose  $z$  frézky (vertikální pohyb) a naklánění HTA v rovině  $xz$ . Část HTA s detektorem byla použita včetně justačního stolku CCD kamery, zůstala tak zachována možnost přesného nastavení HTA (poloha kamery vůči zdroji světla a Hartmannově masce).

Na posuvný stůl frézky byla namontována pomocná struktura k níž byl přichycen rám s nalepenými čočkami. Posuvný stůl umožňoval pohyb v osách  $x, y$  frézky (horizontální rovina) s garantovanou přesností  $\pm 20 \mu m$ . Tato pomocná struktura umožňovala naklánění rámu ve dvou osách. Bylo tak možné zajistit aby se shodovaly osy  $x, y, z$  rámu i frézky. Toto bylo prováděno za pomoci komparátoru před započítím každého měření.

Toto testování bylo nejprve vyzkoušeno na testovacím rámu a precizní frézce v INFN Trieste. Testovací rám (3x4 čočky) sloužil pro ověření funkčnosti mechaniky a testování kvality nalepení čoček (je požadována vzduchotěsnost).



*Obr.17: Testování rámu s nalepenými čočkami v CERN  
ukázka připevnění HTA a testovaného rámu k frézce*

Jedna čočka z rámu byla vybrána jako reference (obvykle čočka v krajní pozici rámu, nejvíce se blíží ideálním hodnotám). Posuvný stůl frézky poté zajistil přesunutí HTA k dalším čočkám, kde byla změřena relativní změna jejich polohy vůči referenci. Každá z nalepených čoček byla už dříve testována pomocí HTA, porovnáním těchto testů tak byli získány informace o kvalitě nalepení čoček, mechanice vlastního rámu a kvalitě upevnění rámu.

Nepřesnost nastavení rámu vůči osám  $x, y, z$  frézky vnášela do měření systematickou chybu projevující se jako decentrace a defokusace. Pro každou čočku v rámu byly určeny relativní polohy decentrace (resp. naklonění) a vzdálenosti v ose  $z$  (změna projevující se defokusací obrazu). Pomocí analogického algoritmu popsaného v kapitole 4.5 (opět ekvivalent k metodě nejmenších čtverců) byla provedena dekompozice všech individuálních poloh čoček do tří vad způsobených nepřesným nastavením rámu v osách  $x, y, z$ . Vliv těchto vad byl poté odečten od výsledků měření polohy každé čočky. Tyto

výsledky byli samozřejmě hrubě ověřeny pomocí komparátoru (nepřesnost nastavení rámu způsobovala změnu polohy čoček až  $\pm 0,1 \text{ mm}$  pro čočky nejvzdálenější od referenční). Ve všech případech byla dekompozice přes všechny relativní polohy čoček provedena i pro jiné množiny bazových funkcí. Ve dvou případech algoritmus indikoval „vyboulení“ ve středu rámu. V obou případech se potvrdilo, že přílišné utažení justačních šroubů (sloužících k naklánění rámu) způsobilo mechanickou deformaci poměrně subtilního rámu (relativní poloha čoček ve středu rámu v ose  $z$  vůči čočkám na okraji (relativní 0) byla  $+0,2 \text{ mm}$ ).

Po provedení měření všech 4 rámu, byla identifikována jedna chybně nalepená čočka (individuální test čočky byl v pořádku). Chybné umístění čočky způsobovalo vadu odpovídající decentraci  $0,2 \text{ mm}$ . Dále bylo objeveno 5 čoček vykazujících vady na hranici tolerancí a malý počet čoček blízko povoleným tolerancím.

#### 4.9 Test asférických čoček

Testované asférické čočky byly namontovány do držáků, tyto držáky byly vloženy do HTA a analyzovány. Celkem bylo testováno 617 asférických čoček. Jako reference sloužila teoretická čočka (simulace v ZEMAXu), jako reálná reference byly použity prototypy v konkrétních držácích. Opět byla použita nejprve zjednodušená varianta Hartmannova testu (viz. 4.7) pro předběžné vyhodnocení a následovala podrobnější analýza (deformace vlnoplochy) v několika konkrétních případech. Tento test tedy vyhodnocoval zároveň kvalitu asférické čočky a přesnost jejího upevnění v držících (vyhodnocován byl systém čočka + konkrétní držák). Čočky byly upevněny do držáku pomocí mezikroužku se závitem (samocentrovací mechanismus [13,29]), pokud byl systém shledán vyhovujícím byl spoj zakápnut lepidlem.

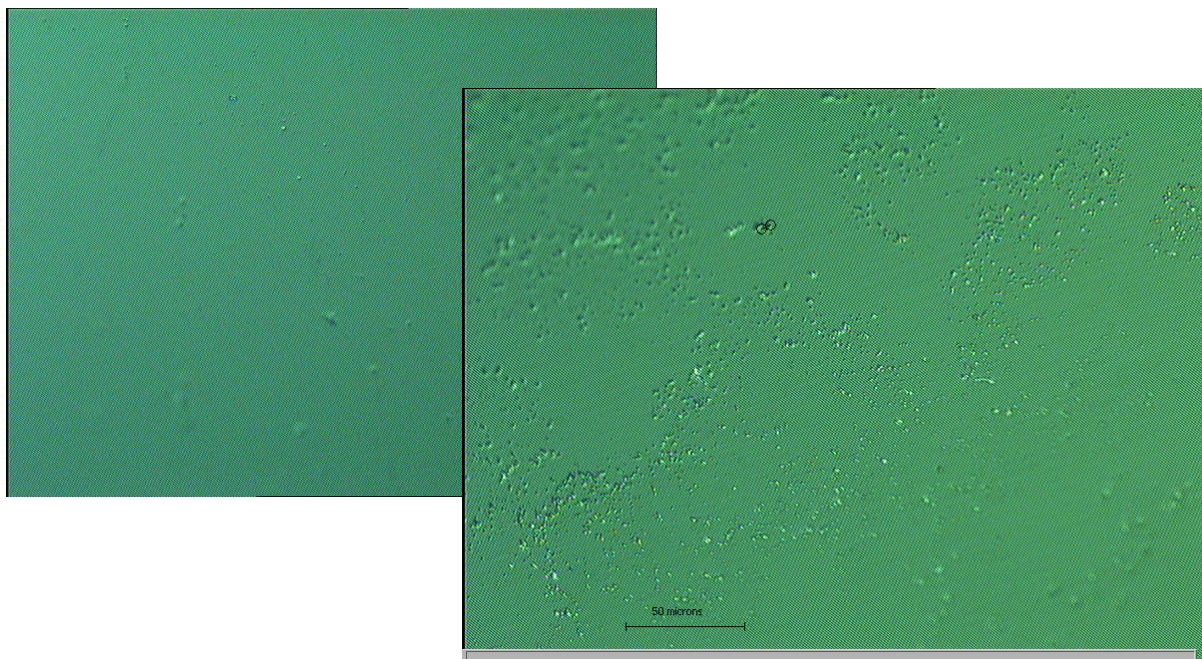
Ihned po zahájení testování se ukázalo, že 30-40 % vzorků vykazuje náklon  $\pm 0,1-0,3^\circ$  (dovolená tolerance  $0,05^\circ$ ). Za pomoci prototypových čoček bylo zjištěno, že tato vada je způsobena nepřesnou výrobou držáků. Držáky čoček byly vyrobeny z magneticky měkkého železa (z důvodu stínění fotonásobiče před magnetickým polem), které se velmi špatně obrábí. Nepřesnosti výroby držáků proto nelze hodnotit jako chybu výrobce (mechanická dílna University Freiburg), který udělal maximum možného.

V daném čase nebylo možné vyrobit nové držáky čoček. Větší část vady bylo možno odstranit dodatečným obrobením držáků – obroušením plochy na níž dosedá držák s fotonásobičem a ostatních hran. Důvodem bylo především nedostatečné odjehlení hran. Jako zásadně důležité se tak ukázalo, že byl testován držák s čočkou a jako referenční povrch (který dosedá na HTA) byla vybrána styčná plocha mezi držákem čočky a držákem fotonásobiče.

I přes odstranění hlavního problému přesto ~ 20 % vzorků vykazovalo dvojnásobné překročení tolerancí pro náklon (resp. decentraci). HTA také odhalila velké rozdíly v mechanických rozměrech jednotlivých držáků (rozsah: nominální hodnota  $\pm 0,2\text{ mm}$ ), které však nemají zásadní vliv na decentraci asférické čočky (viz. 4.10).

Bylo nutno použít i držáky překračující tolerance, jako nezbytné se ukázalo vyvinout metodu pro kompenzaci největších vad teleskopů (i s ohledem na zjištěnou chybně nalepenou prizmatickou čočku)

Kvalita tvaru asférického povrchu byla ve všech případech v mnohem lepší než požadovaná (zjištěná variace byla stejná jako u prototypových čoček). Jako velice problematická se ukázala kvalita povrchu čoček, které obsahovaly plošně rozsáhlé poškozené oblasti (jednotky až desítky  $\text{mm}^2$  oblasti difúzního charakteru) – viz. Obr.18.



*Obr.18 Mikroskopický snímek poškozené oblasti čočky a její srovnání s nepoškozenou částí čočky (laskavostí laboratoře A.Braema, CERN)*

Čočky na kterých byla poškozená oblast větší než  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  byly vyřazeny. Z celkem 617 testovaných čoček bylo vybráno 562 vyhovujících. Ve všech ostatních testovaných parametrech čočky s velkou rezervou splňovaly požadované tolerance. Z 562 asférických čoček a 590 použitelných držáků bylo vybráno (zkombinováno) a otestováno 576 kompletů určených pro montáž do ráků.

#### 4.10 Test kompletních teleskopů

Po sestavení ráků (rám s nalepenými prizmatickými čočkami, rám vymezující vzdálenost mezi čočkami a rám namontovanými držáky asférických čoček) byl celý komplet upevněn na podpůrnou strukturu použitou v testu justace prizmatických čoček (4.8). K obráběcí hlavě frézky byla v tomto případě upevněna pouze část HTA se zdrojem světla a Hartmanovou maskou. CCD kamera byla upevněna na speciální držák, který umožnil její vsunutí do otvoru držáku asférické čočky. Bylo možno zajistit aby se CCD kamera nacházela v pozici v níž byl později upevněn fotonásobič.

Nejprve byla, za pomoci komparátoru, nastavena správná pozice testovaných kompletů vůči osám  $x, y, z$  frézky. Pozice detektoru je definována mechanikou sestaveného teleskopu. Bylo prokázáno že systematická chyba zanášená do měření nepřesným nastavením kompletu je zanedbatelná, je-li přesnost nastavení kompletu lepší než  $\pm 0,1 \text{ mm}$  (změna hodnoty na komparátoru při posunu po celé mechanice kompletu).

Porovnávána byla výsledná deformace obrazu (způsobená všemi vadami teleskopu) vůči ideálnímu teleskopu simulovanému v prostředí ZEMAX. Tento test tedy nejlépe simuluje reálné podmínky během provozu.

Nepřesnost výroby držáků způsobila vznik další systematické chyby. Průměr otvorů držáků do nichž byla vložena CCD kamera byl vyroben s tolerancí  $\pm 0,2 \text{ mm}$ . Mechanika držáku CCD kamery byla zvolena jako standardní mechanické řešení používané pro okulárové výtahy teleskopů. Držák má kruhový tvar s pružnými členy na obvodu. Po vložení do otvoru s větším průměrem než je průměr držáku, zajistí pružné členy jeho relativně pevné umístění v otvoru. Tímto způsobem bylo možno zajistit umístění CCD kamery během testování v otvorech s různým průměrem. Osa držáku (a střed čipu kamery) však v tomto případě není shodná s osou otvoru. Bylo provedeno několik měření (typicky 3), po každém měření byl držák s CCD kamerou otočen o  $\sim 120^\circ$ . Byl tak charakterizován



různý průměr otvorů a provedena korekce změřených dat (pozorovaný obrazu do středu rotace).

Jak je patrné z přípustných tolerancí pro montáž, klíčové pro kvalitu zobrazení teleskopu je přesné umístění asférické čočky. Decentrace asférické čočky o  $50\text{ }\mu\text{m}$  způsobuje posunutí spotů o  $61\text{ }\mu\text{m}$ . Bylo tedy třeba zaručit, že vzájemná decentrace osy otvoru v rámu a osy asférické čočky nebude větší než zmíněných  $50\text{ }\mu\text{m}$ . Otvory na držáku asférické čočky, stejně jako vnější hrana držáku, byly vyráběny během jedné operace na jednom stroji. Pro upevnění čočky byl použit samocentrovací mechanismus [13,29]. Osa čočky tak s velkou přesností odpovídá ose otvorů držáku (odchylky byly odhaleny během testování HTA a opraveny). Na vnější kruhovou část držáku je upevněn O-kroužek, držák je poté vtlačen do otvoru v rámu a přišroubován. Primární funkce O-kroužku je centrování držáku asférické čočky (sekundární úloha je dodatečné těsnění garantující vzduchotěsnost). Měřením bylo prokázáno, že při nepoužití této metody nelze garantovat polohu asférické čočky s požadovanou tolerancí (s dramatickým dopadem na kvalitu zobrazení teleskopu).

#### 4.11 Kompenzace vad teleskopů

Zjištěné vady překračující přípustné tolerance (viz. 4.8 a 4.9), způsobovaly posun obrazu v rovině MAPMT v několika případech až  $200\text{ }\mu\text{m}$ . Bylo tak nutno vyvinout metodu pro alespoň částečnou kompenzaci těchto vad. Zároveň nebylo možné v daném čase vyvinout a vyrobit novou mechaniku. Pro jemnou kompenzaci vad bylo využito držáků asférických čoček.

Na ploše držáku kam později dosedá držák s fotonásobičem je umístěno 8 otvorů. 4 otvory slouží pro upevnění držáku k rámu, další 4 otvory se závitem slouží pro upevnění držáku fotonásobiče k držáku asférické čočky. Při použití kratších šroubů než plánovaných, bylo možno do otvorů se závitem umístit jak šrouby spojující oba držáky, tak bezhlavé šrouby. Otáčením těchto šroubů (a jejich vysunováním z otvoru proti rámu) bylo možno jemně měnit naklonění držáku s asférickou čočkou a ovlivňovat tak kvalitu zobrazení teleskopu. Výsledná poloha pak byla fixována utažením šroubů přichycujících držák s čočkou k rámu. Tento postup vnáší do systému další vady, bylo nutno ho používat velice uvážlivě a zejména stále testovat kvalitu zobrazení daného teleskopu. Celkem bylo korigováno 26 teleskopů (z celkových 576).

## 5 Zhodnocení výsledků měření

Detailní charakterizace všech čoček a všech teleskopů je v současné době zpracovávána do podoby rozsáhlé databáze. Výsledky a podrobný popis (včetně výpočtu důležitých parametrů jako je např. *Single photon resolution* detektoru po upgradu) budou uvedeny v COMPASS RICH UP-GRADE technical report, která bude publikována na podzim roku 2008. Tato práce si klade za cíl pouze stručně popsat postup a předběžné výsledky testování optických komponent.

Pro vlastní testování bylo rozhodující stanovit přesnosti měření. Analýza vlivu jednotlivých nepřesností na celkovou chybu měření není triviální problém. Vzhledem k nedostatku času, byl ve všech případech proveden odhad chyb měření – každé měření bylo opakováno a získaná data byla statisticky vyhodnocena. Byla vyhodnocena nejistota měření pro jednotlivé měřené vady testovaných optických komponent (nepřesnost v určení decentrace, naklonění, defokusace a dalších). Pro všechny případy byla tato nejistota menší než 10 %. Z bezpečnostních důvodů bylo rozhodnuto používat během testování HTA s uměle definovanou nepřesností měření 10 %. Cílem testování bylo garantovat, že parametry optického systému jsou v mezích přípustných tolerancí. Prioritou tak nebylo přesně vyčíslit nejistoty měření, ale udělat jejich dobrý horní odhad. Ze stejného důvodu byly některé tolerance uměle sníženy (podrobnosti budou uvedeny ve zmiňované COMPASS RICH UP-GRADE technical report).

Prototypy prizmatických čoček se ukázaly jako plně vyhovující a výroba byla zadána firmě SILO.

Prototypy asférických čoček dodaných firmami SILO a Tecnottica Consonni, překračovaly požadované tolerance. Toto bylo způsobeno především problémy při výrobě asférického povrchu. Výroba asférických čoček byla zadána firmě ASPHERICON, jejíž čočky byly bezpečně v mezích tolerancí.

Kvalita optických povrchů vyrobených prizmatických čoček byla řádově lepší než námi požadovaná (jak bylo očekáváno). Mechanické rozměry čoček se v mnoha případech blížily maximálním přípustným tolerancím. Přesnost upevnění prizmatických čoček v rámech je dána především přesností rozměrů čoček. Bylo nutné vybrat 576 čoček

určených k nalepení do rámců – čočky jejichž mechanické rozměry nejvíce odpovídají nominálním.

Byla vyhodnocena kvalita upevnění 4x144 prizmatických čoček v rámech. Byla nalezena jedna chybně nalepená čočka (překroční tolerancí), dále pět čoček jejichž nepřesné nalepení způsobovalo vady na hranicích tolerancí.

Kvalita tvaru optických povrchů asférických čoček byla vyhodnocena jako plně vyhovující. Mechanické rozměry všech čoček byli také v mezích tolerancí. Povrch mnoha čoček vykazoval plošně rozsáhlé defekty, z 617 vyrobených čoček bylo použitelných pouze 576.

Bylo zjištěno že nepřesnost výroby držáků asférických čoček způsobuje zásadní překročení tolerancí pro upevnění asférické čočky. Držáky byly částečně opraveny, přesto však bylo nutno použít i držáky, které způsobovaly mírné překročení tolerancí pro upevnění asférické čočky.

Byla charakterizována kvalita zobrazení všech 576 sestavených teleskopů. V 26 případech byly provedeny mírné korekce (dodatečným nakloněním asférické čočky). Jako dominantní vada zobrazení teleskopů se projevil především posun obrazu v rovině detektoru.

Bylo ověřeno že 70 % teleskopů vykazuje posunutí obrazu v rovině MAPMT o méně než  $50\ \mu\text{m}$ ; 20 % teleskopů o méně než  $100\ \mu\text{m}$ ; 10 % teleskopů o méně než  $150\ \mu\text{m}$ . Každý MAPMT obsahuje 16 pixelů s rozměry  $4 \times 4\ \text{mm}^2$  a mezerou  $0,1\ \text{mm}$  mezi jednotlivými pixely.

Posun obrazu o 50 (resp. 100)  $\mu\text{m}$  způsobuje, že 2 (4) % fotonů dopadají místo na správný pixel do mezery mezi nimi a zároveň další 2 (4) % jsou posunuta z mezery na sousední pixel. Tolerance 150  $\mu\text{m}$  přidává další 2 % fotonů dopadající na sousední pixel.



## 6 Závěr

Během 16 měsíců se úspěšně podařilo vybrat vhodnou metodu a metodiku testování. Provést softwarové simulace testu a test optimalizovat. Byla vyvinuta, sestavena a otestována měřicí aparatura pro testování čoček, využívající Hartmannovy metody, včetně příslušného softwaru pro zpracování naměřených dat. Bylo provedeno testování prototypů čoček, schválení výrobcí čoček a provedena srovnávací studie Hartmannova testovacího aparátu s interferometrickými metodami. HTA byl úspěšně použit pro testování kvality 690 prizmatických čoček, dále byla s jeho pomocí změřena kvalita nalepení 576 prizmatických čoček, byla vyhodnocena kvalita a justace ~ 600 asférických čoček. Byla vyhodnocena kvalita zobrazení 576 sestavených teleskopů a provedeny nutné korekce v případě 26 teleskopů.

Po provedených úpravách mechaniky a kompenzacích teleskopů, je možno s jistotou konstatovat, že sestavené teleskopy jsou v mezích požadovaných tolerancí. Dominantní vadou zobrazení teleskopů je posun obrazu v rovině detektoru, který způsobuje že méně než 5 % fotonů dopadá na nesprávný pixel fotonásobiče (což je v dobré korespondenci s vadami vznikajícími v elektronické části detektoru - přeslechy mezi kanály,... viz [8]).

Detektor RICH-1 po upgradu zaznamenal pronikavé zlepšení parametrů. Detekovaný kroužek je nyní tvořen průměrně 56 fotony (před upgradem 14), globální rozlišení měřených Cherenkovových úhlů je nyní menší než  $0,3 \text{ mrad}$  (dříve  $0,6$ ). Razantně se zlepšilo časové rozlišení nyní  $\sim 0,5 \text{ ns}$  (původně  $\sim 3 \mu\text{s}$ ). Je možné s vysokou přesností separovat  $\pi/K$  až do  $55 \text{ GeV}/c$  (dříve 43), atd. – blíže viz [3-6].

Detektor RICH-1 se tak po upgradu stal nejefektivnějším a nejlépe pracujícím detektorem svého druhu na světě.

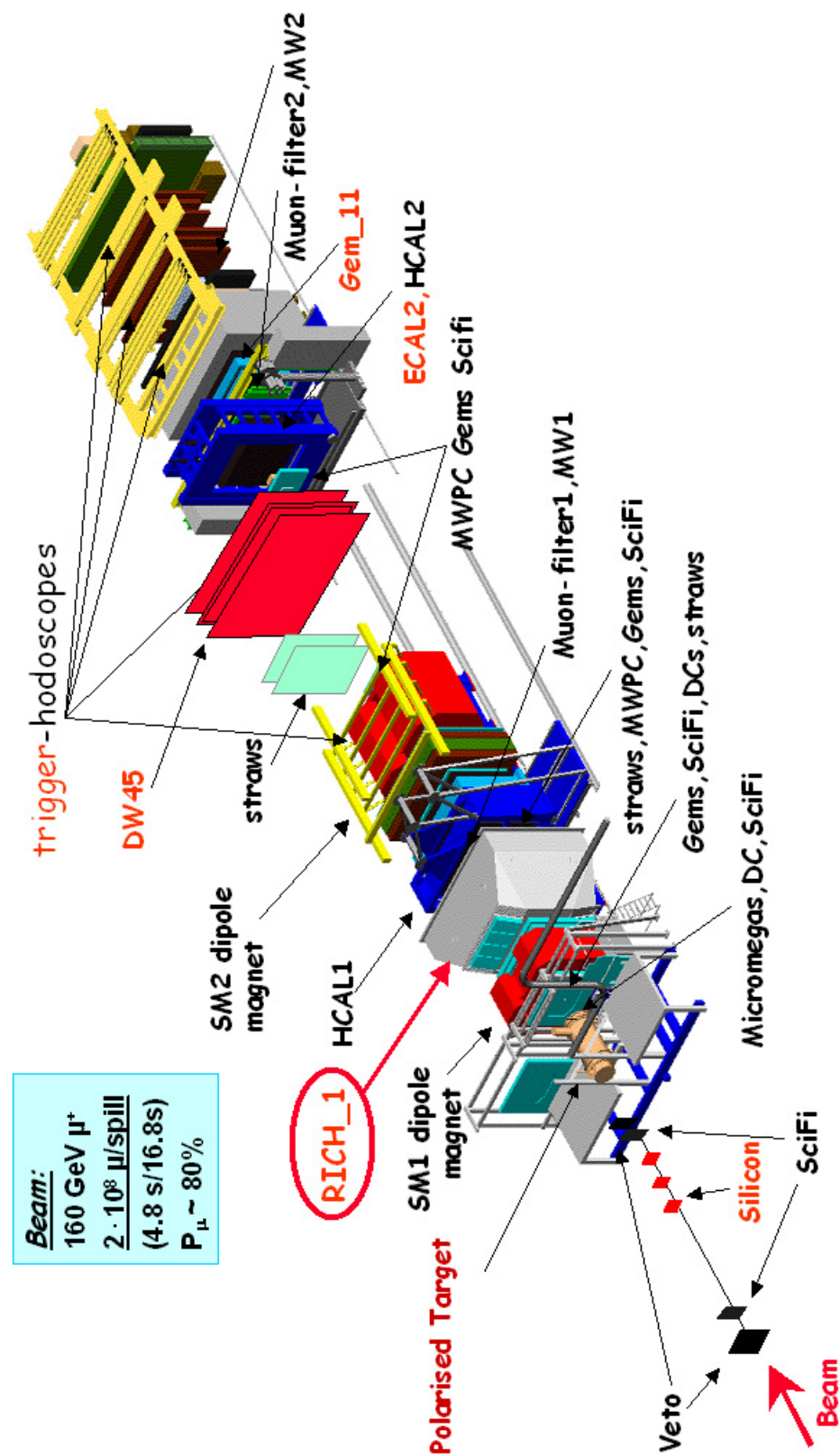
## Seznam literatury

- [1] P.Fauland, The COMPASS experiment and the RICH 1 detektor, Ph.D Thesis, University of Bielefeld, Germany, 2004
- [2] P.Abbon et al., The COMPASS experiment at CERN, NIM-A 577 (3): 455-518 JUL 11 2007
- [3] M. Alekseev et al., Studies for a fast RICH, NIM-A, Volume 553, Issues 1-2 , 11 November 2005, Pages 53-57
- [4] P.Abbon et al., Design and status of COMPASS FAST-RICH, NIM-A, 567 (1): 114-117 NOV 1 2006
- [5] P.Abbon et al., Fast photon detection for COMPASS RICH-1, NIM-A 572 (2007) 419–421
- [5] P.Abbon et al., Fast photon detection for particle identification with COMPASS RICH-1, NIM-A 580 (2): (2007) 906-909
- [6] P.Abbon et al., , Fast photon detection for COMPASS RICH-1, CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS 56: F307-F314 Suppl. F, 2006
- [7] D.Kramer; Systém pro soustředění světla v detektoru Čerenkovova záření, diplomová práce, TU Liberec, 2005
- [8] L. Steiger, Testování mnohokanálových fotonásobičů pro detektor Čerenkovského záření Compass – RICH, diplomová práce, TU Liberec, 2006
- [9] P. Abbbon et al., Optical telescopes for COMPASS RICH-1 up-grade, CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS 56: F315-F322 Suppl. F, 2006
- [10] P. Abbbon et al., Hartmann test of the COMPASS RICH-1 optical telescopes, CZECHOSLOVAK JOURNAL OF PHYSICS 56: F323-F328 Suppl. F, 2006
- [11] J. C. Wyant, Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology, Applied Optics and Optical Engineering, vol. XI , 1992
- [12] M.Laub, Development of opto-mechanical tools and procedures for the new generation of RICH-detectors at CERN, disertační práce, ČVUT fak. strojní , Praha; 2001
- [13] P.R.Yoder, Handbook of Optics, chapter 37 – Mounting Optical Components, McGraw-Hill inc. , Optical Society of America , (Baas M. – editor in chief), 1995
- [14] D.W. de Lima Monteiro, CMOS–based integrated wavefront sensor, Ph.D. Thesis, TU Delft, Netherlands, 2002
- [15] D.Malacara, Hartmann test of Aspherical Mirrors, Applied Optics vol. 11, No. 1, 1972
- [16] L.J.Golden, Dynamic Hartmann Test , Applied Optics vol. 14, Oct 1975, page 2391-2399

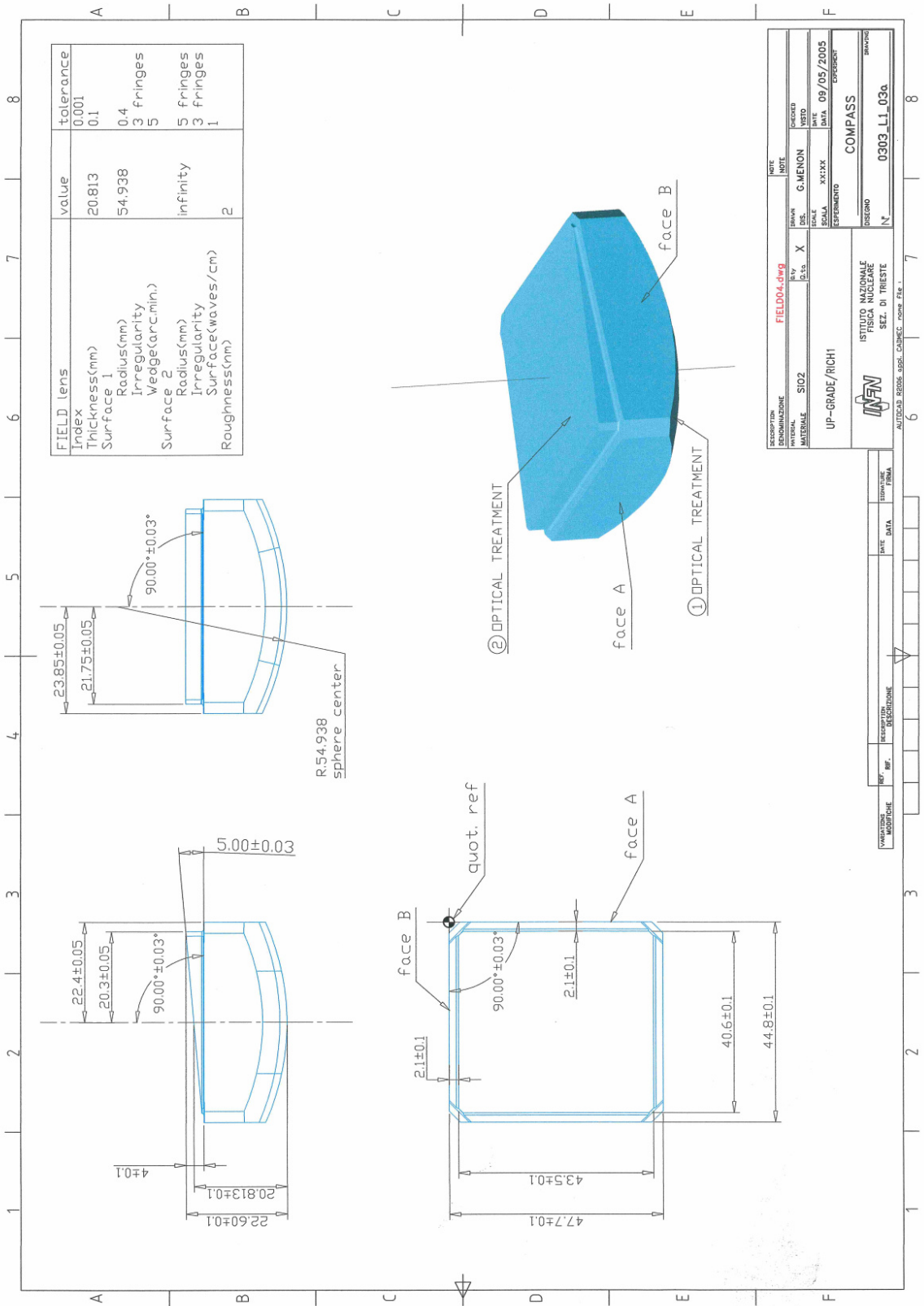
- [17] A.Morales., D.Malacara, Geometrical parameters in the Hartmann test of aspherical mirrors, *Applied Optics*, vol. 22, Dec. 15, 1983, page 3957-3959
- [18] H.Laude, S.Olivier, C.Dirson, JP Huignard, Hartmann wave-front scanner, *Optics Letters*, vol. 24, Issue 24, page 1796-1798
- [19] M.Rocktaeschel, H.J.Tiziani, Limitations of the Shack-Hartmann sensor for testing optical aspherics, *Optics and Laser Technology*, vol. 34, Issue 8, page 631-637
- [20] L.A.Poyneer, Scene-Based Shack-Hartmann Wave-Front Sensing: Analysis and Simulation, *Applied Optics*, vol. 42, Issue 29, page 5807, 2003
- [21] R.Irwan., G.R.Lane, Analysis of optimal centroid estimation applied to Shack-Hartmann sensing, *Applied Optics*, vol. 38, Issue 32, page 6737, 1999
- [22] D.H.Schulte, A Hartmann Test Reduction Program, *Applied Optics*, vol. 7 , No. 1, January 1968, page 119-123
- [23] J.Pfund, N.Lindlein, J.Schwider, Misalignment effects of the Shack-Hartmann sensor, *Applied Optics*, vol. 37, No 1, page 22-27, 1998
- [24] T.Mitsuhashi, M.Tadano, MEASUREMENT OF WAVEFRONT DISTORTION CAUSED BY THERMAL DEFORMATION OF SR EXTRACTION MIRROR BASED ON HARTMANN SCREEN TEST AND ITS APPLICATION FOR CALIBRATION OF INTERFEROMETER, *Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference*, Beijing, China; 2001
- [25] Weiyao Zou, Generalized Wavefront Reconstruction Algorithm for slope data, master thesis, University of Central Florida, Orlando, USA , 2003
- [26] M.Šonka, V.Hlaváč, R.Boyle, *Image Processing, Analysis and Machine Vision*; P.S.W. Publishing, Boston 1999
- [27] L.A.Carvalho, Accuracy of Zernike Polynomials in Characterizing Optical Aberrations and the Corneal Surface of the Eye, *Investigative Ophthalmology and Visual Science*. 200,46:1915-1926.
- [28] C. D'Abrosio et al., The optical systems of LHCb RICHes: a study on the mirror walls and mirror specification, LHCb collaboration 2000 – 071 , CERN, Geneva, Switzerland
- [29] A.Baudyš, *Některé měřicí metody v optické výrobě*, Jemná mechanika a optika, 1985
- [30] J.Y.Wang, D.E.Silva, Wave-front interpretation with Zernike polynomials, *Applied Optics*, vol.19, no.9, 1510-1518, 1980
- [31] R.Tyson, *Introduction to adaptive optics*, 99-105, SPIE Press, Bellingham, 2000
- [32] R.Cubalchini, Modal wave-front estimation from phase derivative measurement, *J. opt.Soc.Am.*, vol.69, no.7,972-977,1979

# Příloha 1

## Schéma experimentu COMPASS

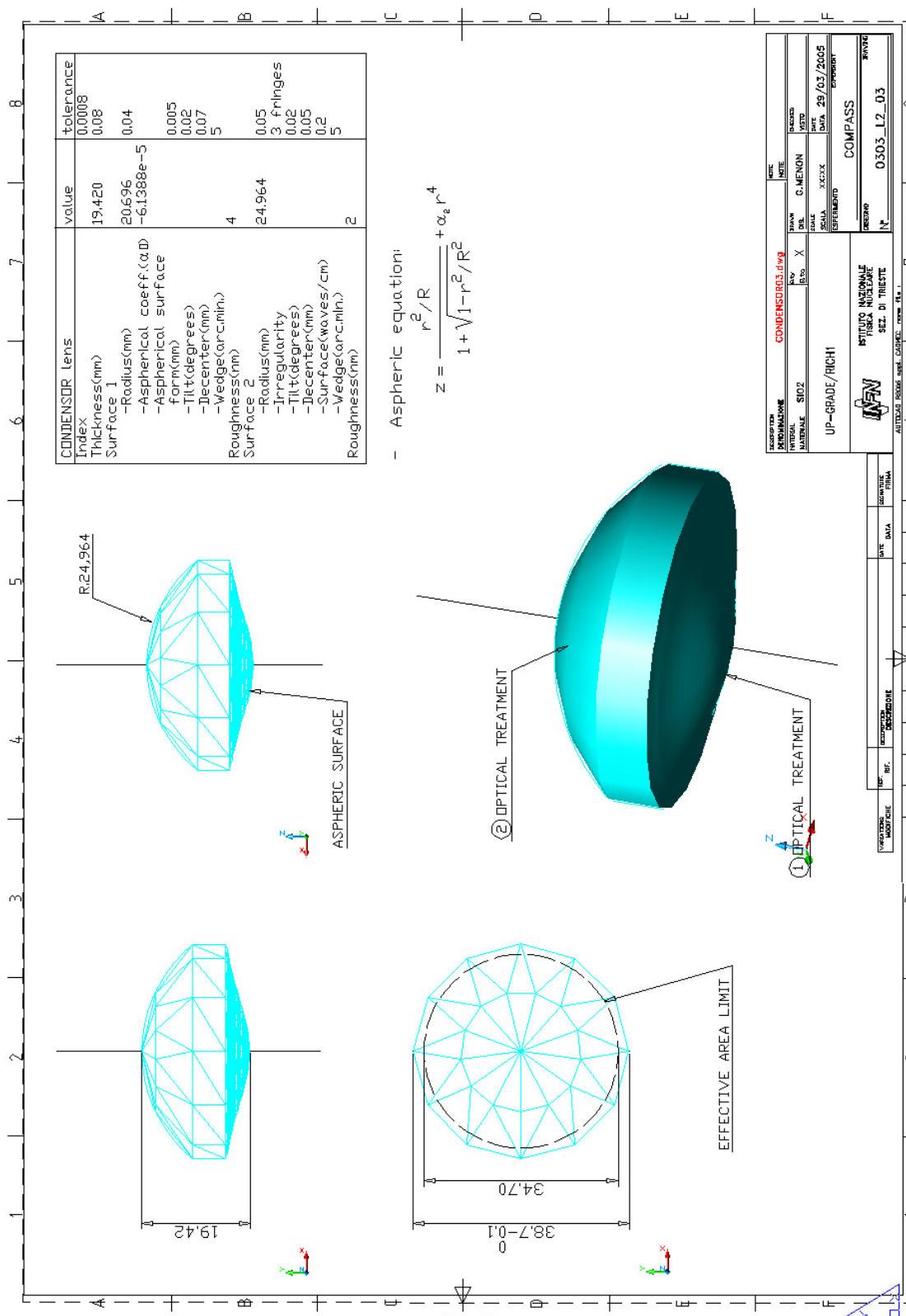


**Příloha 2**  
**Prizmatická čočka**



## Příloha 3

### Asférická čočka

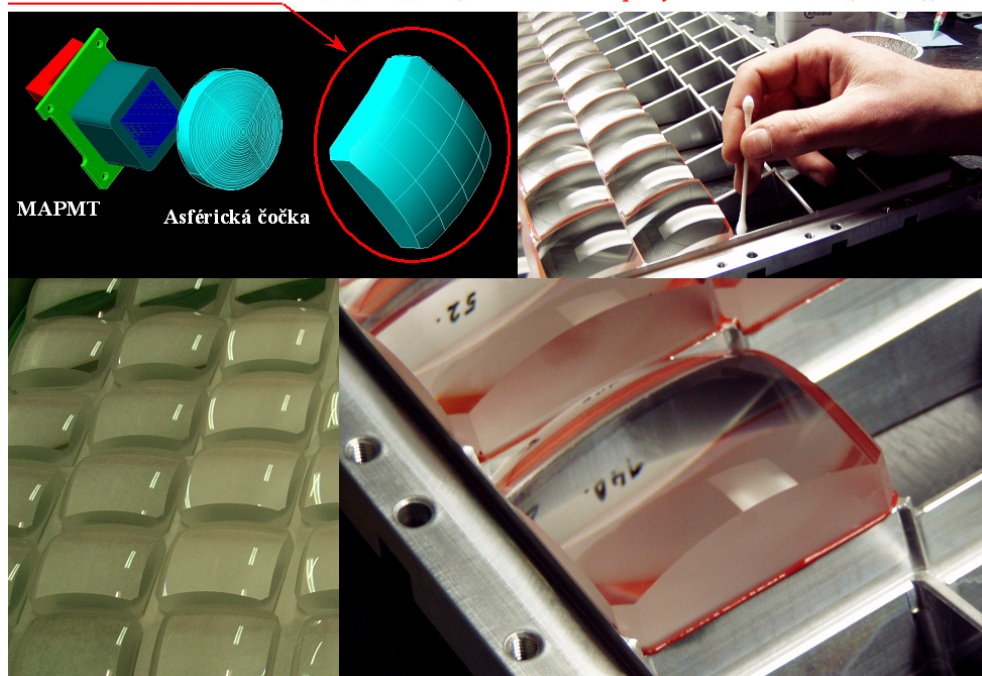




## Příloha 4

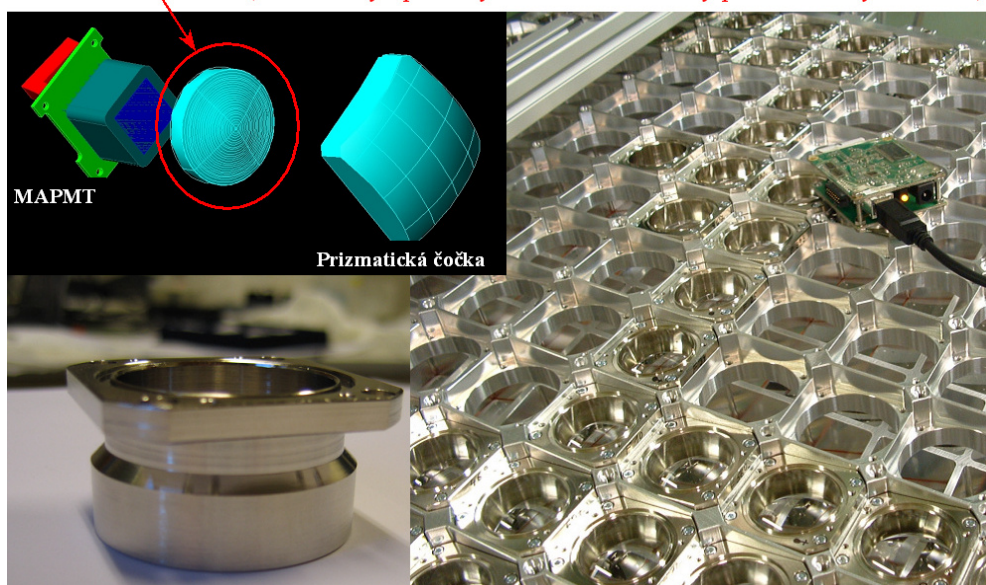
Mechanická konstrukce upevnění čoček

### Prizmatická čočka (576 čoček nalepených na 4 rámech (12x12))



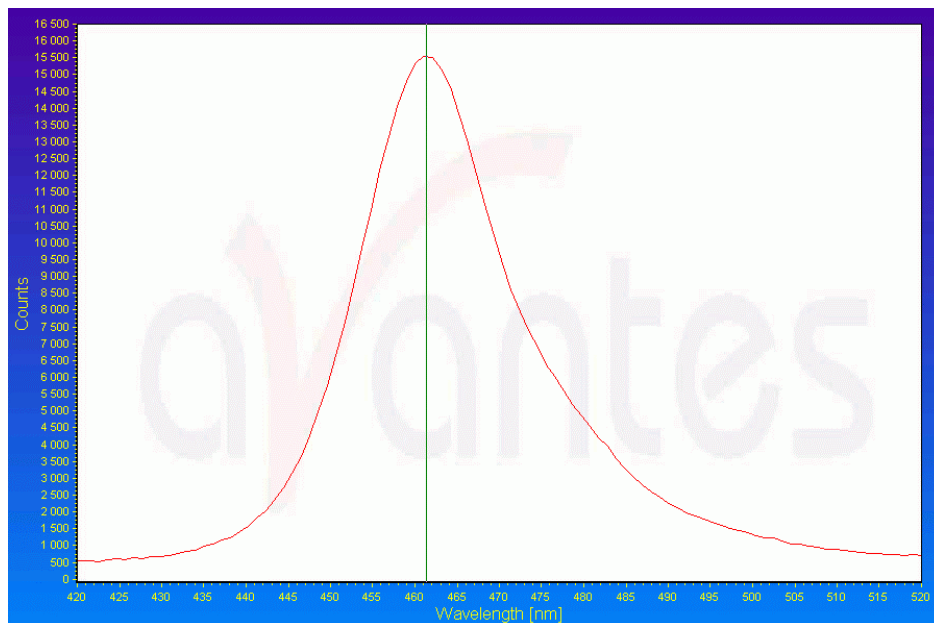
### Asférická čočka

(mechanicky upevněny v držácích / držáky přišroubovány do rámu)

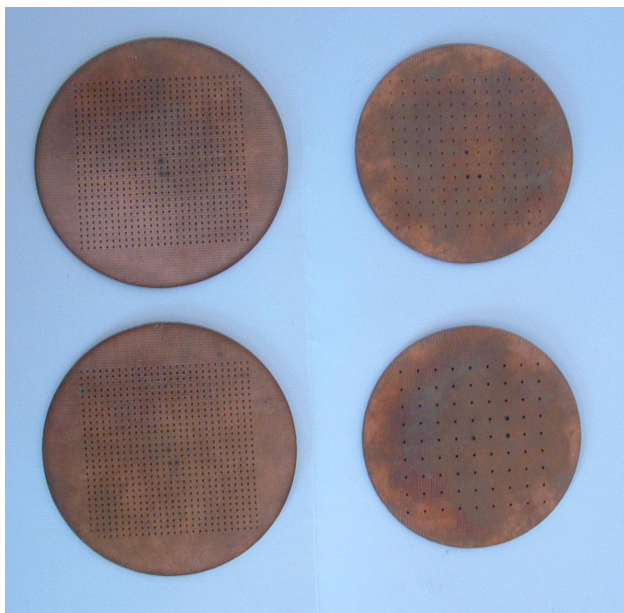


## Příloha 5

### Hartmannův test



Spektrum použitého zdroje světla (LED dioda)



Použité Hartmannovy masky  
(PCB technologie)

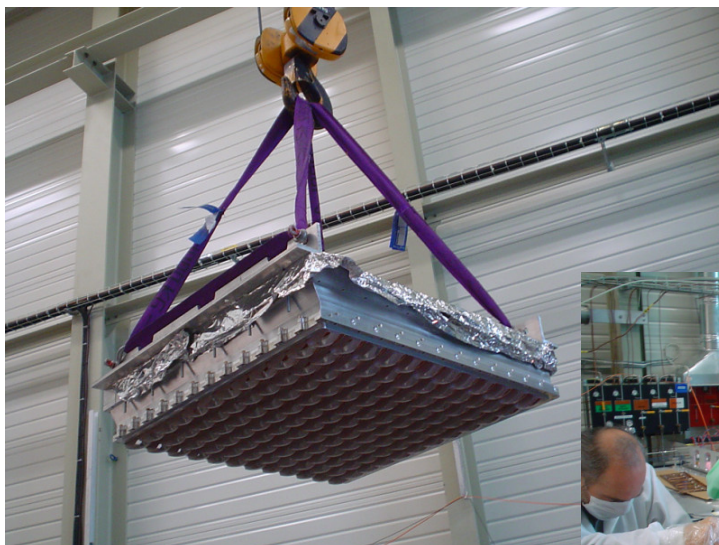


HTA během testování  
kvality prizmatických čoček



## Příloha 6

fotografie z průběhu montáže



Jeden ze sestavených kompletů teleskopů  
během montáže na detektorový panel.



Pohled na vnitřní stranu detektorového panelu  
v centrální části patrné namontované komplety teleskopů (upgradovaná část detektoru)